

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Davor Dundović**

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **Proračun požarnog odimljavanja garažnog prostora**

Mentor:

doc. dr. sc. Severino Krizmanić, dipl. ing.

Student:

Davor Dundović

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Ovom prilikom bih se zahvalio mentoru doc. dr. sc. Severinu Krizmaniću na korisnim savjetima i sugestijama, mag.ing.mech. Božidaru Maslaću i tvrtki Systemair na ukazanoj podršci.

Davor Dundović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Davor Dundović**

Mat. br.: 0035196232

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku:

**Proračun požarnog odimljavanja garažnog prostora**

Naslov rada na  
engleskom jeziku:

**Calculation of evacuation of fire flue gasses in closed garage**

Opis zadatka:

Prilikom projektiranja i izgradnje ventilacije garažnih prostora, pojavljuju se zahtjevi za posebnim postupcima u slučaju pojave požara.

Cilj ovog rada jest obaviti proračun požarnog odimljavanja garažnog prostora.

Za zadani model garažnog prostora, svojstva dimnih plinova, i karakteristike ventilacijskih uređaja, potrebno je primjenom metoda Računalne dinamike fluida proračunati strujanje fluida i usporediti dobivene rezultate s onima iz projektne prakse.

Pisani dio završnog rada treba sadržavati sljedeća poglavlja:

1. Uvod,
2. Opis problema i metoda primijenjenih za njihovo rješavanje,
3. Prikaz dobivenih rješenja i osvrt na rješenja,
4. Zaključak.

U radu je potrebno navesti popis korištene literature i zahvalu na pomoći pri izradi rada.

Zadatak zadan:  
30. studenog 2016.

Rok predaje rada:  
**1. rok:** 24. veljače 2017.  
**2. rok (izvanredni):** 28. lipnja 2017.  
**3. rok:** 22. rujna 2017.

Predviđeni datumi obrane:  
**1. rok:** 27.2. - 03.03. 2017.  
**2. rok (izvanredni):** 30. 06. 2017.  
**3. rok:** 25.9. - 29. 09. 2017.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Severino Krizmanić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA .....	IV
SAŽETAK .....	V
ABSTRACT .....	VI
1. UVOD .....	1
2. Teorijske osnove mehanike fluida .....	2
2.1. Opći oblik zakona očuvanja fizikalnog svojstva .....	3
2.2. Osnovne jednačbe dinamike fluida.....	3
2.2.1. Zakon očuvanja mase (Jednačba kontinuiteta).....	3
2.2.2. Zakon očuvanja količine gibanja .....	3
2.2.3. Zakon očuvanja energije .....	4
2.2.4. Jednačba savršenog plina .....	4
2.3. Turbulentno strujanje fluida .....	4
2.3.1. Statističko opisivanje turbulencije .....	5
2.3.2. Vremenski osrednjene jednačbe za nestlačivo strujanje .....	7
2.3.3. Modeli turbulencije.....	8
2.3.4. Model Smagorinskyog za simulacije velikih vrtloga (eng. Large Eddy Simulations).....	9
3. Metoda konačnih volumena.....	10
4. Ventilacija.....	13
5. CFD analiza požarnog odimljavanja podzemne garaže .....	16
5.1. Geometrija i proračunska mreža.....	16
5.2. Rubni uvjeti .....	18
5.3. Modeliranje požara .....	20
5.4. Rezultati CFD analize .....	21
6. Zaključak .....	34
LITERATURA.....	35
PRILOZI .....	36

## POPIS SLIKA

Slika 1. Opis postupka numeričke simulacije .....	2
Slika 2. Mreža konačnih volumena lopatice turbine .....	10
Slika 3. Potisni ventilator za IV 50-4/8 (F).....	14
Slika 4. Dokumentacija modela IV 50-4/8 (F).....	15
Slika 5. Model garaže s položajima ventilatora .....	17
Slika 6. Mreža od 43 848 konačnih volumena.....	17
Slika 7. Mreža od 354 428 konačnih volumena.....	18
Slika 8. Spajanje čvorova i postavljanje opcija za <i>Duct</i> .....	19
Slika 9. Definiranje karakteristike HVAC uređaja.....	19
Slika 10. Rubni uvjeti krova vozila .....	19
Slika 11. Rubni uvjeti odsisnih ventilatora.....	19
Slika 12. Krivulja oslobađanja topline [3] .....	20
Slika 13. Konture dima gorućeg vozila nakon 1 min .....	21
Slika 14. Konture dima gorućeg vozila nakon 3 minute .....	22
Slika 15. Konture dima gorućeg vozila nakon 10 minuta .....	22
Slika 16. Konture dima gorućeg vozila nakon 20 minuta .....	23
Slika 17. Konture dima gorućeg vozila nakon 30 minuta .....	23
Slika 18. Konture dima gorućeg vozila nakon 45 minuta .....	24
Slika 19. Konture dima gorućeg vozila nakon 80 minuta .....	24
Slika 20. Konture dima gorućeg vozila nakon 110 minuta .....	25
Slika 21. Konture dima gorućeg vozila nakon 140 minuta .....	25
Slika 22. Konture temperature na visini 1.7 m nakon 1 minute .....	26
Slika 23. Konture temperature na visini 1.7 m nakon 5 minuta .....	26
Slika 24. Konture temperature na visini 1.7 m nakon 10 minuta.....	27
Slika 25. Konture temperature na visini 1.7 m nakon 30 minuta.....	27
Slika 26. Konture temperature na visini 1.7 m nakon 45 minuta.....	28
Slika 27. Konture temperature na visini 1.7 m nakon 80 minuta.....	28
Slika 28. Konture polja brzine na visini od 3.1425 m nakon 1 minute .....	29
Slika 29. Konture polja brzine na visini od 3.1425 m nakon 10 minuta .....	29
Slika 30. Konture polja brzine na visini od 3.1425 m nakon 30 minuta .....	30
Slika 31. Konture polja brzine na visini od 3.1425 m nakon 45 minuta .....	30
Slika 32. Konture polja brzine na visini od 3.1425 m nakon 80 minuta .....	31
Slika 33. Vektorski prikaz polja brzina na visini od 2.5 m nakon 1 minute.....	31
Slika 34. Vektorski prikaz polja brzina na visini od 2.5 m nakon 10 minuta.....	32
Slika 35. Vektorski prikaz polja brzine na visini od 2.5 m nakon 30 minuta.....	32
Slika 36. Vektorski prikaz polja brzina na visini od 2.5 m nakon 45 minuta.....	33
Slika 37. Vektorski prikaz polja brzine na visini od 2.5 m nakon 30 minuta.....	33
Slika 38. Usporedba rezultata simulacije s eksperimentalnim podacima.....	34

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Tehnički podaci za IV 50-4/8 (F).....	14
Tablica 2. Dimenzije uz dokumentaciju .....	15
Tablica 3. Podaci garaže .....	16

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$A$	$m^2$	Površina konačnog volumena
$c_v$	$J/kgK$	Specifični toplinski kapacitet
$D$	$kg/s$	Jačina difuzije
$F$	$kg/s$	Jačina konvekcije
$f_i$	$N/kg$	Komponente vektora specifične masene sile
$l_t$	$m$	Duljina puta miješanja
$p$	$N/m^2$	Tlak
$\bar{p}$	$N/m^2$	Statistički osrednjeno polje tlaka
$p'$	$N/m^2$	Pulzirajući dio polja tlaka
$q_h$	$W/m^3$	Volumenska gustoća toplinskog izvora
$Re$	—	Reynoldsov broj
$T$	$K$	Temperatura
$t$	$s$	Vrijeme
$v_i$	$m/s$	Komponenta vektora brzine
$\bar{v}_i$	$m/s$	Statistički osrednjeni dio komponente vektora brzine
$v'_i$	$m/s$	Pulzirajući dio komponente vektora brzine
$\delta_{ij}$	—	Kroneckerov delta simbol
$\Sigma_{ij}$	$N/m^2$	Tenzor viskoznih naprezanja
$\lambda$	$W/mK$	Toplinska provodnost materijala
$\varphi$	—	Polje fizikalne veličine
$\Delta n$	$m$	Udaljenost između čvorova
$\Gamma$	$kg/ms$	Koeficijent difuzije
$\Gamma_t$	$kg/ms$	Koeficijent turbulentne difuzije
$\mu$	$Pa\ s$	Dinamička viskoznost
$\mu_t$	$Pa\ s$	Turbulentna viskoznost
$\rho$	$kg/m^3$	Gustoća
$\mu$	$Pa\ s$	Dinamička viskoznost



## SAŽETAK

Posljedice požara u podzemnim garažama mogu biti ogromne, ne samo zbog materijalne štete, već zbog opasnosti za ljudske živote. Zbog toga se u današnje vrijeme postavljaju posebni zahtjevi prilikom projektiranja na sustave kontrole i izvlačenje dima. Prilikom izbijanja požara u garaži, nastaje velika količina dimnih plinova visoke temperature, te zbog smanjene visine garaže, otežavaju regulaciju dima. Podzemne garaže moraju imati ventilaciju da bi osiguralo izvlačenje produkata izgaranja motora vozila i da bi se u slučaju požara izvukao dim. U današnje vrijeme sve više prostora u projektiranju uzimaju potisni ventilatori umjesto sustava cjevovoda. Cilj ovog rada je napraviti numeričku simulaciju strujanja fluida u garaži s potisnim ventilatorima. Koristeći se metodama računalne dinamike fluida izračunat će se i prikazati polje brzine kao glavna smjernica za postavljanje komponenata ventilacije, te temperaturno polje prema propisanoj visini. Proračun je izvršen u programskom paketu *PyroSim*.

Ključne riječi: Požar, podzemna garaža, ventilacija, potisni ventilator, računalna dinamika fluida

## ABSTRACT

Underground car parks are places where fire can, not only do material damage, but take human lives. Design of HVAC (Heating, Ventilation, Air Conditioning) and smoke regulation systems needs to satisfy fire safety conditions. When a fire breaks out in underground car park, a large amount of flue gases is generated at high temperature. Because of reduced height, flue gases control and extraction is somewhat difficult. Underground car parks need to have means of ventilation, that will provide exhaust of combustion products and flue gasses in case of fire. Jet fans are getting more attention in HVAC design instead of traditional ductwork system. Objective of this paper is to make a computational fluid dynamics (CFD) analysis of underground car park with jet fans. Utilising methods of computational fluid dynamics flow and temperature field will be calculated and visualized. CFD simulations were carried out using software *PyroSim* which uses freeware code (the Fire Dynamics Simulator).

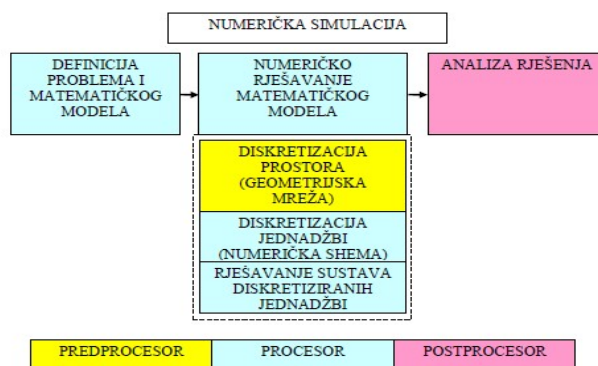
Key words: Fire, uderground car parks, HVAC, jet fans, Computational Fluid Dynamics,

## 1. UVOD

Podzemne garaže moraju imati ventilacijski sustav, koji će izvlačiti produkte izgaranja u motorima vozila prilikom vožnje kroz garažu i u kontroli dima u slučaju požara. U posljednje vrijeme, sve se više koristi ventilacija na principu potisnih ventilatora. Ventilatori generiraju silu koja će povećati količinu gibanja fluidu i pokrenuti strujanje unutar garaže. Zbog geometrije garaže, polje strujanja može biti podosta složeno, te zbog toga se položaj i orijentacija ventilatora moraju pažljivo birati. Općeprihvaćene smjernice za projektiranje ovakvih sustava baš i nema, većinom su to smjernice od proizvođača ventilacijskih sustava. Zbog toga programski paketi koji se temelje na metodama računalne dinamike fluida mogu biti alat koji će projektantu omogućiti optimalno postavljanje komponenata ventilacije. U slučaju požara prioritet je izbaciti dim van i zbog toga odgovarajući ventilacijski sustav mora biti efikasan. To će osigurati brzu i sigurnu evakuaciju ljudi iz garaže te dovoljnu vidljivost za vatrogasce da kontroliraju požar. Rješenje koje je uobičajeno za garaže velikih trgovačkih centara jest implusna ventilacija koja se sastoji od aksijalnih ventilatora. Prilikom projektiranja ventilacijskih sustava najvažniji parametri su broj, položaj i orijentacija ventilatora, koje projektant postavlja prema preporukama i prema iskustvu. Ipak, metodama računalne dinamike fluida ( u daljnjem tekstu CFD) može se dobiti polje strujanja, te se izvršiti optimiranje i kontrola rada ventilacijskog sustava.

## 2. Teorijske osnove mehanike fluida

Mehanika fluida je teorijsko eksperimentalna znanost. Teorijski pristup se temelji na analitičkom rješavanju matematičkih modela strujanja fluida. Većina problema vezana uz strujanje fluida je opisana nelinearnim parcijalnim diferencijalnim jednačbama za koje ne postoje analitička rješenja. Zbog nelinearnosti jednačbi koje opisuju problem, većina rješenja u mehanici fluida se dobivalo eksperimentom. Uz nagli razvoj računala, počinje se razvijati grana mehanike fluida pod nazivom Računalna dinamika fluida, pri čemu se nelinearne parcijalne jednačbe rješavaju numeričkim metodama. Proces numeričke simulacije prikazan je na slici 1.



Slika 1. Opis postupka numeričke simulacije

Simulacija započinje definiranjem problema i matematičkog modela. Matematički model je matematički zapis fizikalnog modela, odnosno pretpostavki koje koristimo da bismo opisali fenomene u stvarnom svijetu. Prilikom stvaranja fizikalnog modela potrebno voditi računa da model bude što točniji, ali i matematički što jednostavniji. Najčešća pretpostavka koja se koristi za opis strujanja fluida jest da je fluid kontinuum. Kontinuum je zamišljena tvar koja u potpunosti ispunjava prostor i zadržava fizikalna svojstva i za slučaj infinitenzimalno malog volumena. Iako je svaki realni fluid diskretne strukture hipotezu kontinuuma moguće je primjeniti za probleme u kojima su dimenzije proračunske domene dovoljno velike u odnosu na međumolekularni razmak.

## 2.1. Opći oblik zakona očuvanja fizikalnog svojstva

Općenito zakon očuvanja fizikalnog svojstva glasi : Brzina promjena sadržaja fizikalnog svojstva unutar materijalnog volumena jednaka je izvoru ili ponoru tog fizikalnog svojstva. Opća konvekcijsko-difuzijska jednažba izražena preko specifičnog fizikalnog svojstva  $\phi$

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_j \phi)}{\partial x_j} - \Gamma \frac{\partial \phi^2}{\partial x_j \partial x_j} = S_\phi \quad (1)$$

## 2.2. Osnovne jednažbe dinamike fluida

Osnovni zakoni koji opisuju strujanje fluida su: zakon očuvanja mase, zakon očuvanja količine gibanja, zakon očuvanja momenta količine gibanja, zakon očuvanja energije i drugi zakon termodinamike. U slučaju da nema momenata raspodijeljenih po volumenu i po površini materijalnog volumena zakon očuvanja momenta količine gibanja svodi se na simetričnost tenzora naprezanja. Drugi zakon termodinamike koristi za utvrđivanje fizikalnosti procesa i jedina nepoznata veličina je entropija. Drugi zakon termodinamike se rješava neovisno o drugim jednažbama.

### 2.2.1. Zakon očuvanja mase (Jednažba kontinuiteta)

Zakon očuvanja mase glasi: Brzina promjene mase materijalnog volumena je jednak nuli.

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

### 2.2.2. Zakon očuvanja količine gibanja

Zakon količine gibanja glasi: Brzina promjene količine gibanja materijalnog volumena jednaka je sumi vanjskih masenih i površinskih sila koje djeluju na materijalni volumen.

$$\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i v_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (-p \delta_{ij} + \Sigma_{ij}) + \rho f_i \quad (3)$$

Član  $\Sigma_{ij}$  u jednažbi (3) označava simetrični tenzor viskoznih sila. Ako se zanemari volumenska viskoznosti fluida, prema Newtonovom zakonu viskoznosti tenzor viskoznih sila se može modelirati :

$$\Sigma_{ij} = \mu \left( \frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (4)$$

### 2.2.3. Zakon očuvanja energije

Brzina promjene zbroja unutrašnje i kinetičke energije materijalnog volumena jednaka je snazi vanjskih masenih i površinskih sila koji djeluju na materijalni volumen i brzini izmjene topline materijalnog volumena s okolinom.

$$\frac{\partial(\rho c_v T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho c_v v_j T)}{\partial x_j} = -p \frac{\partial v_j}{\partial x_j} + \Sigma_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + q_h \quad (5)$$

### 2.2.4. Jednadžba savršenog plina

Povezuje veličine stanja idealnog plina. U navedenim relacijama od (2) do (6), poznate veličine su viskoznost  $\mu$ , toplinska provodnost fluida  $\lambda$ , specifični toplinski kapacitet pri konstantnom volumenu  $c_v$ , specifična plinska konstanta  $R$ , intezitet masenih sila  $f_i$ , toplinski izvori  $q_h$ , dok su gustoća  $\rho$ , tlak  $p$ , temperatura  $T$  i brzina  $v$  nepoznanice.

$$p = \rho RT \quad (6)$$

## 2.3. Turbulentno strujanje fluida

Turbulentno strujanje fluida je najčešći oblik strujanja u prirodi. Turbulencija je uvijek bila problem za matematičko opisivanje zbog svoje stohastičke prirode. To je izrazito nestabilno strujanje koje karakterizira kaotično gibanje čestica u kojem sve veličine pokazuju pulsacije u vremenu i prostoru. Zbog intezivnog miješanja čestica na većim ili manjim razinama povećana je disipacija energije. Turbulentno strujanje se pojavljuje pri visokim Reynoldsovim brojevima. Reynoldsov broj pokazuje omjer inercijskih i viskoznih sila, a matematički se definira prema jednadžbi:

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (7)$$

Veličine u jednađbi (7) su gustoća  $\rho$ , brzina fluida  $v$ , karakteristična dimenzija  $L$ , i viskoznost  $\mu$ . Prelazak laminarnog u turbulentnog strujanja odvija se pri kritičnim vrijednostima Reynoldsovog broja. I kod laminarnog i kod turbulentnog strujanja pojavljuje se granični sloj uz tijelo u kojem se brzina strujanja mijenja od nule do brzine u neporemećenoj struji. U području graničnog sloja, viskozne sile se ne mogu zanemariti, te zbog toga što je gradijent brzine najveći uz stijenku, posmično naprezanje na stijenci će također biti najveće.

### 2.3.1. Statističko opisivanje turbulencije

U razvijenom turbulentnom strujanju sve fizikalne veličine pokazuju slične pulsacije u širokom spektru frekvencija i valnih duljina. Zbog toga bi kod direktnog numeričkog rješavanja Navier-Stokesovih jednađbi prostorni korak, odnosno proračunska mreža, morala biti toliko sitna da obuhvati i najmanje amplitude pulsacija, a vremenski korak toliko mali da obuhvati i najviše frekvencije turbulentnih pulsacija što bi bilo prezahtjevno što se tiče računalnih resursa. Takva simulacija bi davala numeričke vrijednosti polja fizikalnih veličina u puno točaka i u puno vremenskih trenutaka.

Budući da inženjere zanimaju integralne vrijednosti veličina, koje također pokazuju promjene u vremenu, njih bi zanimalo samo prosječne vrijednosti i eventualno amplitude odstupanja od prosječnih veličina. Najčešće se koristi vremensko (Reynoldsovo) uprosječenje. U turbulentnom strujanju neku fizikalnu veličinu  $f$  prikazujemo kao zbroj vremenski uprosječene vrijednosti  $\bar{f}$  i pulsirajuće vrijednosti  $f'$ . Prosječna vrijednost u vremenskom trenutku  $T_0$  je po definiciji.

$$f(x_i, t) = \frac{1}{T_0} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} f(x_i, t - \tau) d\tau \quad (8)$$

$T_0$  je odabrano tako da vrijedi  $\bar{f} = \bar{\bar{f}}$ . Za dobro odabrano razdoblje uprosječenja vrijedi da je prosječna vrijednost pulsirajućeg dijela fizikalne veličine  $f$  jednaka nuli, odnosno  $\bar{f}' = 0$ .

Primjenom Reynoldsovog osrednjavanja na opći oblik zakona očuvanja za nestlačivo strujanje ( jednađba (1) ). Uz konstantan koeficijent difuzije  $\Gamma$  uprosječena jednađba je

$$\frac{\partial(\rho\bar{\varphi})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\bar{v}_j\bar{\varphi})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial x_j} - \rho\bar{v}_j'\bar{\varphi}' \right) + S_\varphi \quad (9)$$

Vidljivo je da se u uprosječnoj jednadžbi osim uprosječenih vrijednosti javljaju i predstavnici pulirajućeg strujanja  $-\rho\bar{v}_j'\bar{\varphi}'$ . Za tu nepoznanicu bi mogli teoretski izvesti jednadžbu koja bi opisivala njen prijenos, ali bi se u njoj javljale nove nepoznanice. Prijenos novih nepoznanica bi se mogao opisati novom jednadžbom, ali bi broj nepoznanica rastao brže od broja jednadžbi pa sustav ne bi bio zatvoren.

U strujanju fluida fizikalno svojstvo se prenosi putem konvekcije i difuzije. Prijenos fizikalne veličine putem konvekcije odvija se kao posljedica gibanja čestica fluida koje za sobom nose fizikalno svojstvo.

Prijenos fizikalnog svojstva putem difuzija odvija se zbog kaotičnog gibanja atoma, odnosno molekula po prostoru. Makroskopski gledano difuzija je posljedica postojanja gradijenta fizikalnog svojstva. Difuzijski proces je spontan i postoji sve dok postoji gradijent fizikalne veličine. U turbulentnom strujanju čestice fluida se gibaju i u poprečnom smjeru u odnosu na smjer strujanja i sa sobom nose fizikalno svojstvo. Zbog sličnosti prijenosa fizikalnog svojstva zbog turbulencije i uslijed difuzije uvodimo pojam turbulentne difuzije. Turbulentna difuzija postoji samo ako postoji gradijent fizikalnog svojstva jer miješanje čestica fluida u polju konstantne fizikalne veličine nema efekta u smislu prijenosa fizikalnog svojstva. Zbog sličnosti s molekularnom difuzijom turbulentnu difuziju modeliramo pomoću koeficijenta turbulentne difuzije sljedećom relacijom

$$-\rho\bar{v}_j'\bar{\varphi}' = \Gamma_t \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial x_j} \quad (10)$$

Uvrštavanjem (10) u (9):

$$\frac{\partial(\rho\bar{\varphi})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\bar{v}_j\bar{\varphi})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( (\Gamma + \Gamma_t) \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial x_j} \right) + S_\varphi \quad (11)$$



### 2.3.2. Vremenski osrednjene jednadžbe za nestlačivo strujanje

Kao što je rečeno u prethodnom poglavlju u turbulentnom strujanju fizikalnu veličinu promatramo kao zbroj vremenski osrednjene vrijednosti i njene pulsacije. Zbog toga polja tlaka i brzine zapisujemo na sljedeći način

$$p = \bar{p} + p' \text{ i } v_i = \bar{v} + v' \quad (12)$$

Uvrštavanjem izraza za polje brzine iz relacije (12) u relaciju (2), te naknadnim vremenskim osrednjavanjem te jednadžbe dobivamo jednadžbu kontinuiteta za osrednjeno strujanje:

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial x_j} = 0 \quad (13)$$

Uvrštavanjem polja tlaka i brzine u jednadžbu količine gibanja, te naknadnim vremenskim osrednjavanjem dobivamo jednadžbu količine gibanja za osrednjeno strujanje.

$$\frac{\partial(\rho \bar{v}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{v}_i \bar{v}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{v'_j v'_i} \right] \quad (14)$$

Iz gornje jednadžbe je vidljivo da jednadžbu količine gibanja za osrednjeno strujanje nije moguće rješavati neovisno o pulsirajućem strujanju jer se u jednadžbi količine gibanja pojavljuje predstavnik pulsirajućeg strujanja  $-\rho \overline{v'_j v'_i}$ . Taj član označuje turbulentnu difuziju količine gibanja. Molekularna difuzija količine gibanja odgovara viskozim silama pa turbulentnu difuziju količine gibanja nazivamo turbulentnim ili Reynoldsovim naprezanjima. Tenzor Reynoldsovih naprezanja je simetričan tenzor sa šest nepoznanica.

$$-\rho \overline{v'_j v'_i} = \begin{bmatrix} -\rho \overline{v'_1 v'_1} & -\rho \overline{v'_1 v'_2} & -\rho \overline{v'_1 v'_3} \\ -\rho \overline{v'_2 v'_1} & -\rho \overline{v'_2 v'_2} & -\rho \overline{v'_2 v'_3} \\ -\rho \overline{v'_3 v'_1} & -\rho \overline{v'_3 v'_2} & -\rho \overline{v'_3 v'_3} \end{bmatrix} \quad (15)$$

Budući da Reynoldsove jednačbe imaju više nepoznanica nego što imaju jednačbi sustav nema jednoznačno rješenje. Zbog neusklađenosti broja jednačbi i broja nepoznanica uvodimo modele turbulencije koji imaju za zadatak uskladiti taj broj.

### 2.3.3. Modeli turbulencije

Modelima turbulencije prvog reda modelira se tenzor Reynoldsovih naprežanja najčešće prema hipotezi Boussinesqovoj hipotezi.

$$-\rho \overline{v_j' v_i'} = \mu \left( \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho \bar{k} \delta_{ij} \quad (16)$$

Hipotezom Boussinesqa zamjenjuju se komponente tenzora naprežanja s jednim nepoznatim poljem koeficijenta turbulentne viskoznosti  $\mu_t$ . Važno je za spomenuti da turbulentna viskoznost nije fizikalno svojstvo fluida jer ovisi o uvjetima strujanja. Budući da smo turbulentna naprežanja modelirali slično kao viskozna, na sličan način će se pristupiti modeliranju turbulentne viskoznosti kao molekularna viskoznost. Molekularna viskoznost je definirana kinetičkom teorijom plinova, a proporcionalna je gustoći, slobodnoj putanji molekula, i karakterističnoj brzini gibanja molekula.

$$\mu_t = \rho l_t v_t \quad (17)$$

Modeli turbulencije se razlikuju po tome kako se definiraju put miješanja molekula  $l_t$  i karakteristična brzina turbulentnih pulsacija  $v_t$ .

### 2.3.4. Model Smagorinskyog za simulacije velikih vrtloga (eng. *Large Eddy Simulations*)

Joseph Smagorinsky je definirao turbulentnu viskoznost baziranu na derivacijama polja brzine i lokalnoj veličini proračunske mreže.

$$\mu_t = (C_s \Delta g)^2 \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}} \quad (18)$$

U gornjoj jednadžbi  $\Delta g = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{\frac{1}{3}}$  je lokalna veličina mreže,  $C_s = 0.2$  je konstanta, te  $\bar{S}_{ij}$  tenzor definiran

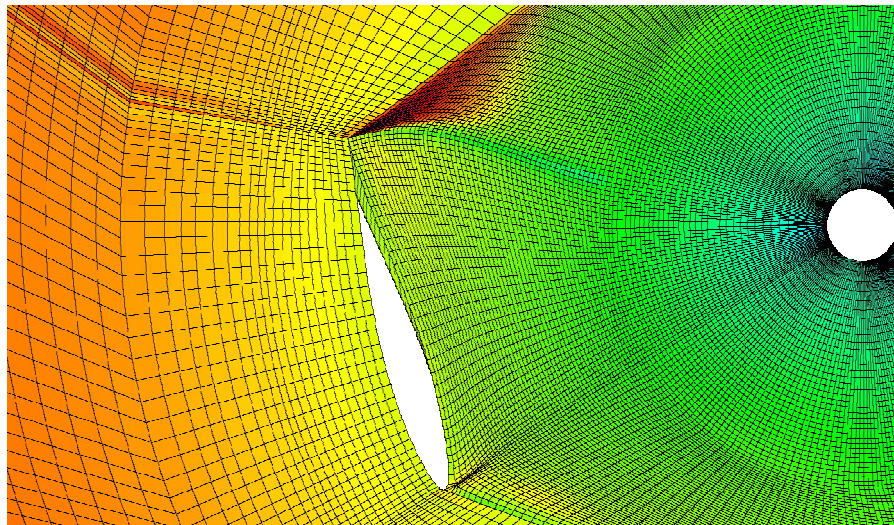
$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) \quad (19)$$

LES je popularna metoda za izračun turbulentnih strujanja. Osnovna ideja LES-a je da se uštedi na računalnim resursima zanemarivanjem pulsacija najviših frekvencija. To se postiže nisko-propusnim filterom primjenjenim na Navier-Stokesove jednadžbe. Takav filter uspješno uklanja najmanje pulsacije iz numeričkog rješenja.

### 3. Metoda konačnih volumena

Zbog nelinearnosti parcijalnih diferencijalnih nije moguće pronaći analitičko rješenje. Zbog toga se primjenjuju numeričke metode, pomoću kojih će se iz sustava diferencijalnih jednačbi preći u sustav algebarskih jednačbi. Jedna od metoda koja je najviše u upotrebi za probleme mehanike fluida i termodinamike je metoda konačnih volumena.

U metodi konačnih volumena, područje strujanja se dijeli na na velik broj konačnih volumena, u kojima se računaju vrijednosti fizikalnih veličina. Konačni volumeni se ne smiju preklapati i moraju u potpunosti ispuniti proračunsku domenu. Svi zakoni očuvanja se mogu primijeniti na svakom konačnom volumenu. Podijeljena proračunska domena na konačne volumene prikazana je na slici 2.



Slika 2. Mreža konačnih volumena lopatice turbine

Postupak diskretizacije jednačbi, odnosno prelazak iz diferencijalnih u algebarski je sljedeći. Opću konvekcijsko difuzijsku jednačbu (2) se integrira po konačnom volumenu  $\Delta V$  te primjenom Gaussovog teorema slijedi izraz :

$$\frac{d}{dt} \int_{\Delta V} \rho \phi \, dV = - \int_{\Sigma \Delta S} \left( \rho v_j \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) n_j \, dS + \int_{\Delta V} S_\phi \, dV \quad (20)$$

Prvi član u jednadžbi (20) označava brzinu promjene fizikalnog svojstva u konačnom volumenu. Drugi član označava zbroj konvektivnog i difuzijskog transpota fizikalnog svojstva kroz površine konačnog volumena  $\Delta S$ . Zadnji član označava izvor fizikalnog svojstva u konačnom volumenu.

Uz pretpostavku da je  $\rho$  konstantan za konačni volumen i da je volumen dovoljno mali da se može pretpostaviti linearna raspodjela  $\varphi$  unutar konačnog volumena tada se prvi član može raspisati kao:

$$\frac{d}{dt} \int_{\Delta V} \rho \varphi dV = \rho \frac{d\varphi_c}{dt} \Delta V \quad (21)$$

Izraz  $\varphi_c$  predstavlja iznos fizikalne veličine u čvoru konačnog volumena.

Površinski integrali koji predstavljaju konvektivni i difuzijski protok kroz konačni volumen se aproksimiraju:

$$\int_{\Delta S} \left( \rho v_j \varphi - \Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \right) n_j dS = \rho v_n \Delta S \varphi_n - \frac{\Gamma \Delta S}{\Delta n} \frac{\partial \varphi}{\partial n} = F_n \varphi_n - D_n \frac{\partial \varphi}{\partial n} \quad (22)$$

Izvorski član se raspisuje na sljedeći način:

$$\int_{\Delta V} S_\phi dV \approx S_c \Delta V \quad (23)$$

Uvrštavanjem izraza (21), (22) i (23) u izraz (20) dobiva se sljedeća jednadžba:

$$\rho \frac{d\varphi_c}{dt} \Delta V = F_n \varphi_n - D_n \frac{\partial \varphi}{\partial n} + S_c \Delta V \quad (24)$$

Član  $S_c \Delta V$  se može linearizirati u obliku  $S_c \Delta V = a + g \varphi_c$ ,  $N_{nb}$  označava broj stranica konačnog volumena. Prema jednadžbi kontinuiteta suma konvekcijskih protoka u čvor mora biti jednaka nuli. Raspisivanjem gradijenta pomoću metode centralnih razlika, i raspisivanjem jednadžbi dobiva se sljedeći izraz:

$$\begin{aligned}
\rho \frac{\varphi_c - \varphi_c^{old}}{\Delta t} \Delta V &= -\varphi_c \sum_{nb=1}^{N_{nb}} a_n^{nb} + \sum_{nb=1}^{N_{nb}} a_n^{nb} \varphi_n^{nb} + a + g \varphi_c \\
\left( \frac{\rho \Delta V}{\Delta t} + \sum_{nb=1}^{N_{nb}} a_n^{nb} + g \right) \varphi_c &= \sum_{nb=1}^{N_{nb}} a_n^{nb} \varphi_n^{nb} + a \frac{\rho \Delta V}{\Delta t} \varphi_c^{old} \\
a_c \varphi_c &= \sum_{nb=1}^{N_{nb}} a_n^{nb} \varphi_n^{nb} + b
\end{aligned} \tag{25}$$

Jednadžba (25) je linearna algebarska jednadžba dobivena diskretizacijom integrala po konačnom volumenu s centralnim čvorom C. Ako se postupak ponovi za sve konačne volumene unutar proračunske domene, dobit će se sustav linearnih algebarskih jednadžbi u kojem su nepoznanice čvorne vrijednosti polja  $\varphi$ . Broj algebarskih jednadžbi je jednak broju čvorova unutar proračunske mreže. Sustav jednadžbi se može zapisati matrično u obliku :

$$[A_{ij}] [\varphi_i] = [b_j] \tag{26}$$

$[A_{ij}]$  je matrica sustava koju u kojoj retke čine koeficijenti  $a_c$  i  $a_n^{nb}$ , pri čemu su koeficijenti  $a_c$  na glavnoj dijagonali. Vektor  $\varphi_i$  označava vektor nepoznatih čvornih vrijednosti fizikalne veličine  $\varphi$ . Na desnoj strani je vektor svih poznatih veličina.

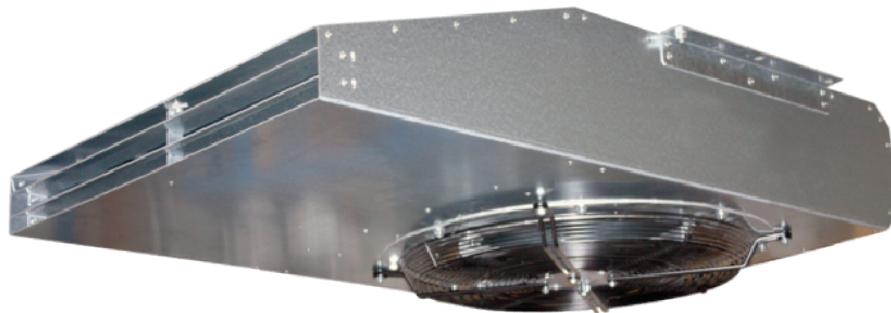
## 4. Ventilacija

Sustav s potisnim ventilatorima su ekonomski opravdano i učinkovito rješenje za ventilaciju i izvlačenje dima u podzemnim garažama. Uobičajeni ventilacijski sustav uključuje odsisne ventilatore, potisne ventilatore, i eventualno dobavne ventilatore ukoliko otvori u garaži nisu dovoljnih dimenzija. Dodatni regulacijski sustav sa detektorima ugljikovog monoksida i detektorima dima (ili topline) je potreban da bi sustav radio u optimalnim uvjetima. Osim uštede prostora, postoje još neke prednosti sustava ventilacije s potisnim ventilatorima nego klasični sustav ventilacije s cjevovodom, a to su :

- Moguće je izvući dim ili dimne plinove izgaranja motora iz određenih dijelova parka, što može značajno doprinijeti na uštedi energije. Detektori CO će osigurati da se ventilatori upale samo u zagađenim dijelovima garaže, ili detektori dima će prebaciti sustav u rad za izvlačenje dima.
- Ušteta novaca i prostora zbog izbjegavanja kompleksnog sustava cjevovoda
- Poboljšana kvaliteta zraka u podzemnim garažama u usporedbi s cjevovodom
- Optimalni način kontrole dima u slučaju požara zbog brzog izvlačenja i hlađenja dima
- Sprječavaju materijalnu štetu u smislu da konstrukcijski dijelovi (grede i strop) su manje toplinski napregnuti
- Fleksibilnost u pozicioniranju ventilatora u slučaju rekonstrukcije garaže
- Energetski učinkovitiji sustav zbog manjeg ukupnog otpora sustava
- Smanjeni troškovi ugradbe i rada

Ventilatori koji će davati potisnu silu su Systemair, model IV 50-4/8 (F) prikazan na slici 3. Tehnički podaci su dani u tablici 1. Broj potisnih ventilatora je 4, a lokacije su prikazane na slici 5. Dobava svježeg zraka je kroz rampu, odnosno ulaz u garažu. Postoje dva odsisna ventilatora i njihova lokacija je prikazana također na slici 5. Zbog ograničenih računalnih resursa i pojednostavljenja modela, vrijeme paljenja ventilatora je od početnog trenutka simulacije.

Napon	4,4 V
Frekvencija	50 Hz
Nominalna snaga na vratilu	1300 W
Maksimalna jakost struje	3,3 A
Potisna sila	52 N
Maksimalan protok	6140 m <sup>3</sup> /h
Broj okretaja propelera	1420 o/min
Težina	94 kg

**Tablica 1. Tehnički podaci za IV 50-4/8 (F)****Slika 3. Potisni ventilator za IV 50-4/8 (F)**

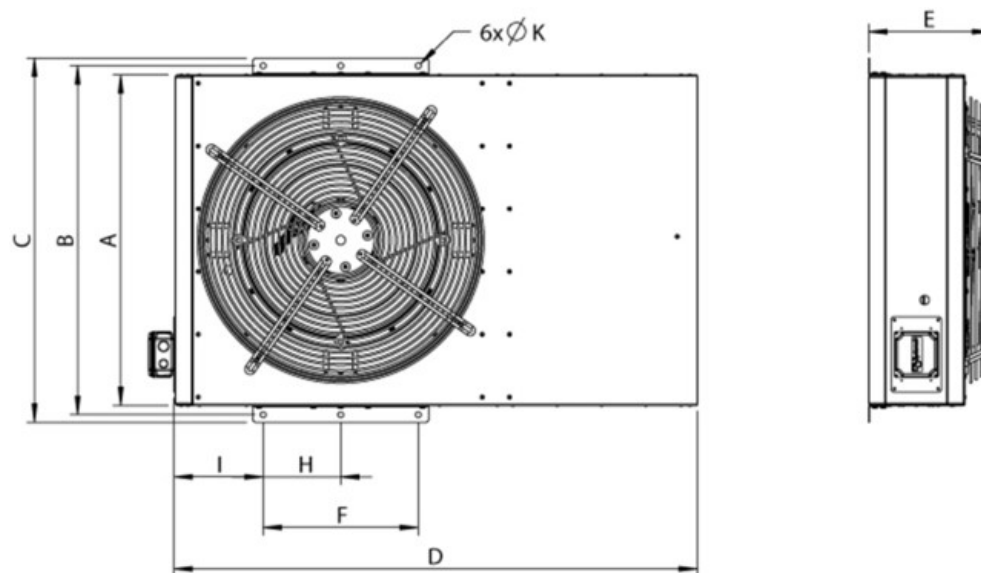
Kao što je već spomenuto neke norme za postavljanje ventilatora ne postoje, već se projektant oslanja na iskustvo i rezultate CFD analiza. Ipak, neki proizvođači nude smjernice i savjete kako postaviti ventilatore.



Neki od korisnih savjeta su:

- Usisna strana ventilatora ne bi trebala biti bliže od 1 m od najbližeg konstrukcijskog objekta ( grede, zida, potporanj,...)
- Ispusna strana ventilatora ne bi trebala biti bliže od 4 m od najbližeg konstrukcijskog objekta

Ventilatori su modelirani bez detalja prema dokumentaciji na slici 4. i prema tablici 2.



Slika 4. Dokumentacija modela IV 50-4/8 (F)

Tablica 2. Dimenzije uz dokumentaciju

	A	B	C	D	E	F	G	H	6ΦK
IV 50	790	834	870	1248	285	370	185	210	13,5

## 5. CFD analiza požarnog odimljavanja podzemne garaže

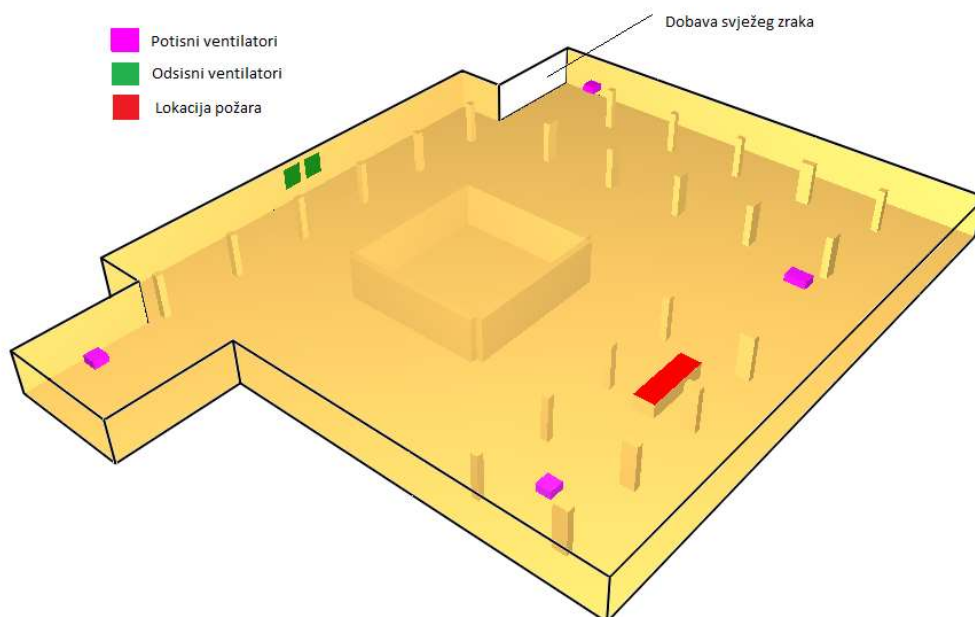
Početak svake CFD analize počinje sa definiranjem geometrije. Model mora biti što jednostavniji, a da što bolje opisuje zadani problem. Nakon izrade modela, potrebno je napraviti proračunsku mrežu, odnosno mrežu konačnih volumena. Slijedi postavljanje matematičkog modela i rubnih uvjeta, te analiza rezultata.

### 5.1. Geometrija i proračunska mreža

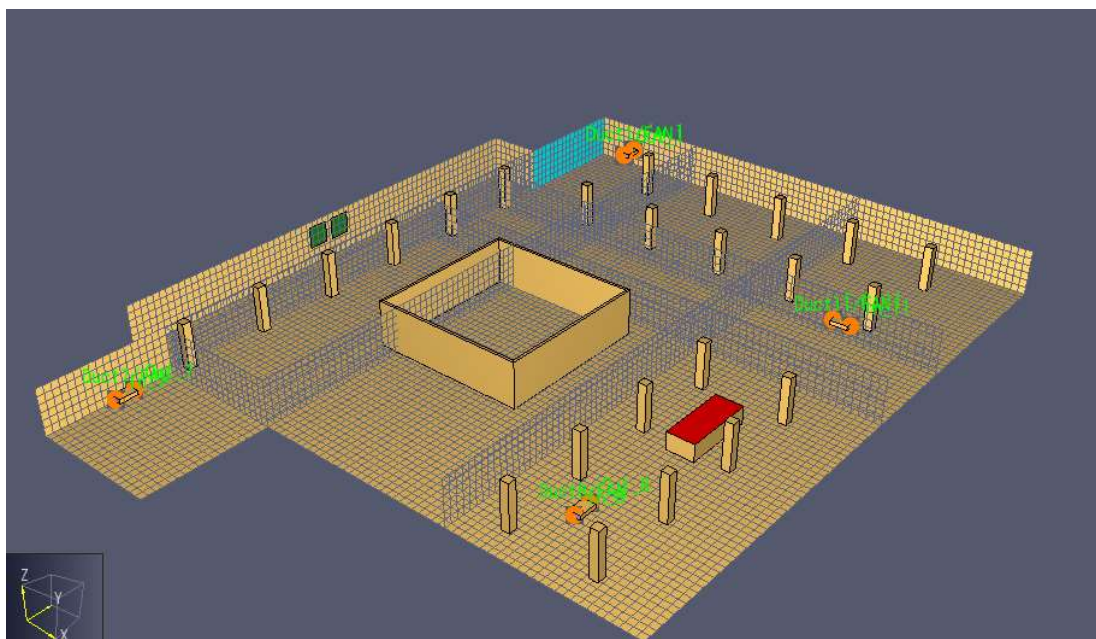
Programski paket *PyroSim* ima modul za izradu geometrije, mreže i proračuna. Model je napravljen u slučaju požara jednog vozila. Zbog jednostavne geometrije mreža konačnih volumena je ortogonalna i strukturirana. U tablici se nalaze podaci o garaži, a na slici 5. se nalazi slika modela. Modul za generiranje mreže unutar programa *PyroSim* kao ulazni podatak treba dvije točke u ravnini tlocrta, i zadanu visinu garaže odnosno mreže. Dobra stvar je što software sam stavlja zidove, tlo, i strop automatski na rubove domene. Na mjestima gdje se nalaze stupovi i zidovi, software ne generira mrežu već prepoznaje da je to čvrsto tijelo. Proračun je izvršen na dvije mreže. Grublja mreža se sastoji od 43 848 konačnih volumena, dimenzija 0,5m x 0,5m x 0,5m. Finija mreža se sastoji od 354 428 konačnih volumena, dimenzija 0,25m x 0,25m x 0,25m.

Efektivna površina garaže	1845.67 m <sup>2</sup>
Visina garaže	3,32 m
Volumen garaže	6127,64 m <sup>3</sup>
Dimenzije vozila	5 m x 2 m x 1,25 m

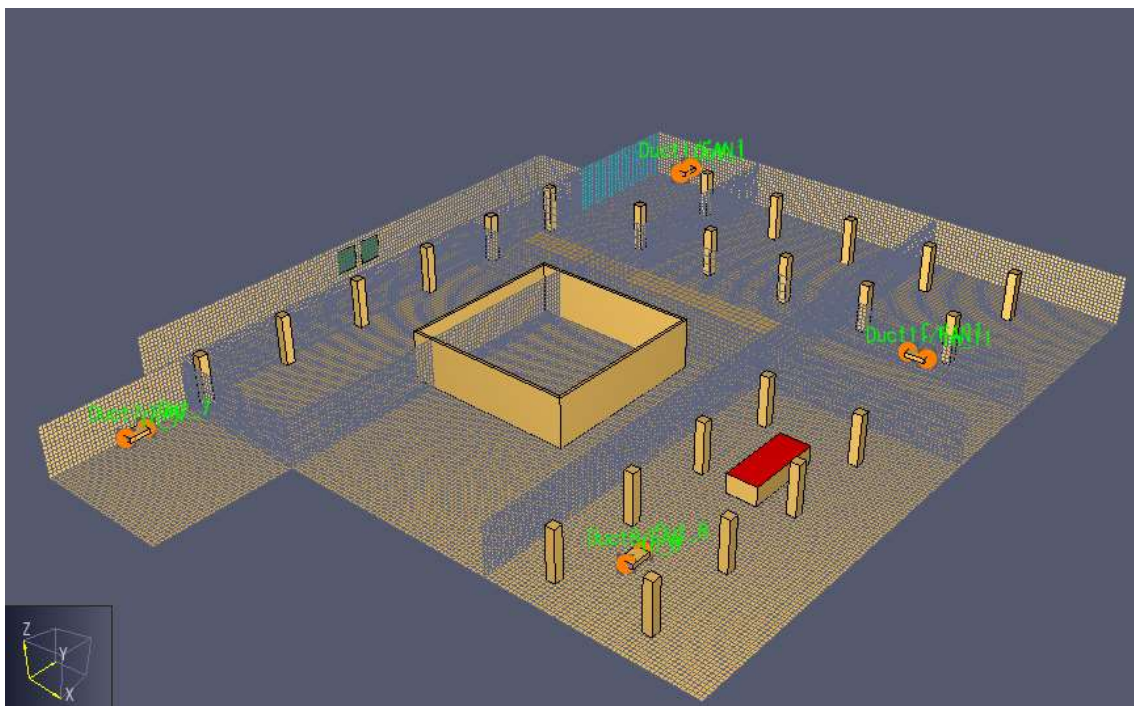
**Tablica 3. Podaci garaže**



Slika 5. Model garaže s položajima ventilatora



Slika 6. Mreža od 43 848 konačnih volumena

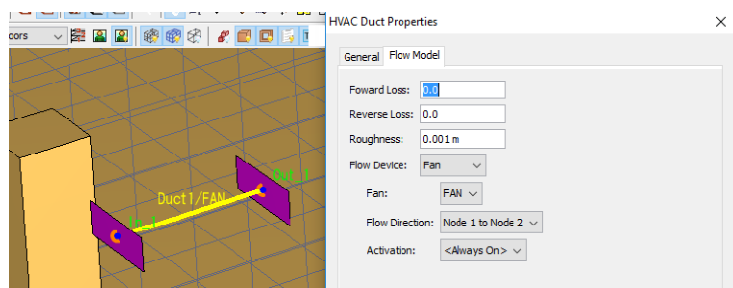
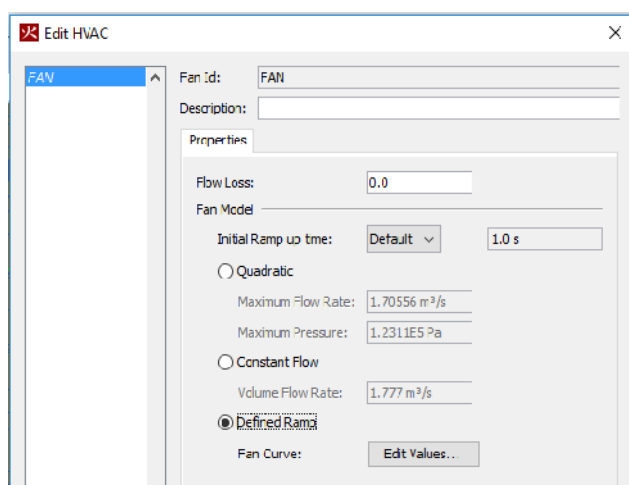


Slika 7. Mreža od 354 428 konačnih volumena

## 5.2. Rubni uvjeti

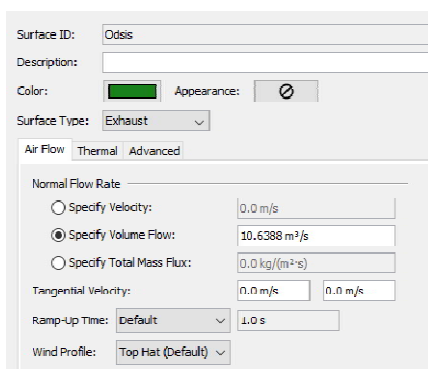
Rubni uvjeti su zadane vrijednosti fizikalne veličine na rubovima proračunske domene. *PyroSim* automatski prepoznaje stupove i zidovi iz modula u kojem je napravljena geometrija i dodaje rubne uvjeti nepropusnosti stijenke.

Za površine kroz koje postoji protok, prvo je potrebno napraviti površinu pomoću opcije *Vent*. Ulaskom u izbornik od odabranog *Vent*-a definira se vrsta površine. Rubni uvjeti na ulaznu rampu postavljeni su pomoću površine *Open* koja služi za modeliranje otvora. Površina ili dobavlja ili izvlači zrak iz proračunske domene da bi se očuvao maseni protok unutar područja proračuna. Ventilatori se modeliraju na način da se naprave površine (*Vent*) na ulaznoj i izlaznoj strani ventilatora. Tako kreiranim površinama se dodjeljuje vrsta površine (*HVAC*). Tako definirana površina je integrirana u *PyroSim* i koristi se za modeliranje ventilacijskih sustava. Za *HVAC* površine potrebno je još definirati čvorove pomoću opcije *Nodes* na ulazu i izlazu da bi se mogao definirati model strujanja. Spajanjem čvorova pomoću opcije *Duct* se definira vrsta uređaja, model strujanja (koji čvor je ulaz, a koji izlaz) sa zadanim karakteristikama uređaja (slika 8.). Karakteristike uređaja se definiraju u izborniku *HVAC properties*. Svojstva ventilatora se mogu definirati na tri načina, prikazna na slici 9.

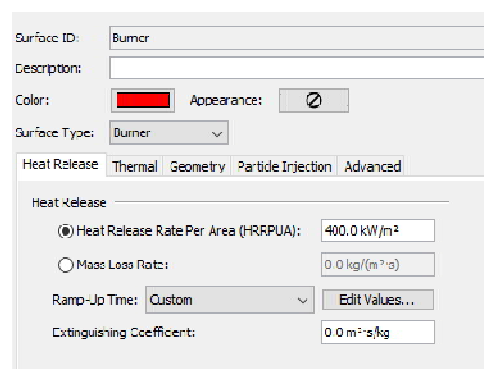
Slika 8. Spajanje čvorova i postavljanje opcija za *Duct*

Slika 9. Definiranje karakteristike HVAC uređaja

Na krovu vozila zadana je površina kroz koju prolazi toplinski tok, s zadanim rubnim uvjetom oslobođene količine topline po jedinici površine (slika 10.). O modeliranju izgaranja i požara biti će riječ više u idućem poglavlju. Preostali su još samo odsisni ventilatori koji su modelirani pomoću konstantnog protoka (slika 11.).



Slika 11. Rubni uvjeti odsisnih ventilatora



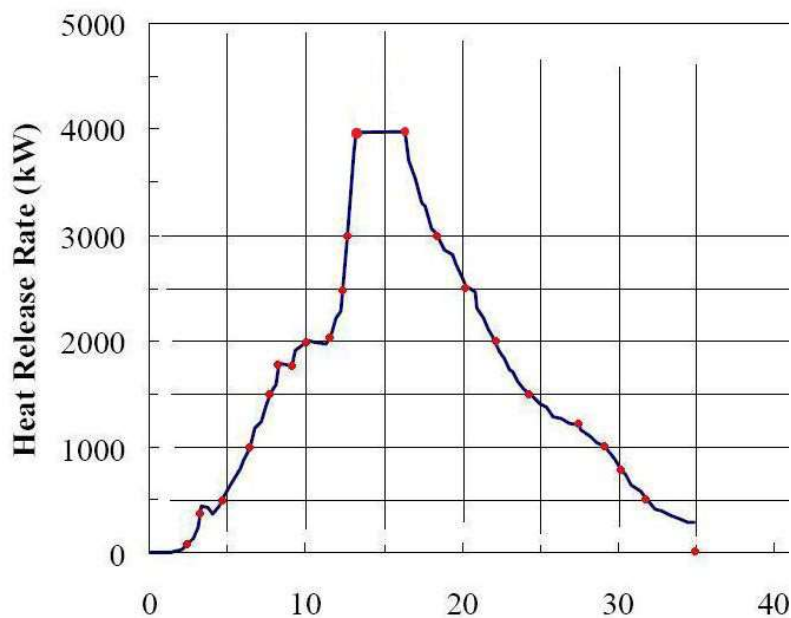
Slika 10. Rubni uvjeti krova vozila

### 5.3. Modeliranje požara

Požar je modeliran kao izgaranje goriva u vozilu s oslobođenom toplinom od 4 MW (Prema BS 7346-7 standardu) s efektima konvekcije i zračenja. Oslobođanje topline nije konstantno kroz vrijeme te je potrebno zadati krivulju prema kojoj se toplina oslobađa u vremenu. Postoje rezultati mjerenja izgaranja jednog vozila, prema kojoj se temelji ovaj model. Kada materijal počne izgarati, svaki požar ima tri faze:

- Rast u kojem je temperatura relativno niska i požar je lokaliziran oko izvora nastanka. U ovoj fazi požar sporo raste ovisno o količini zraka i dostupnosti goriva.
- Potpuno razvijeni požar u kojem je dosegnut najveći iznos oslobođene topline, odnosno najveća temperatura i količina oslobođenih dimnih plinova prilikom izgaranja.
- Opadanje, period definiran kada temperatura padne na 85% maksimalne vrijednosti. U ovom periodu brzina izgaranja je smanjena zbog toga što je gorivo potrošeno. Određeno vrijeme vatra će imati visoku lokalnu temperaturu.

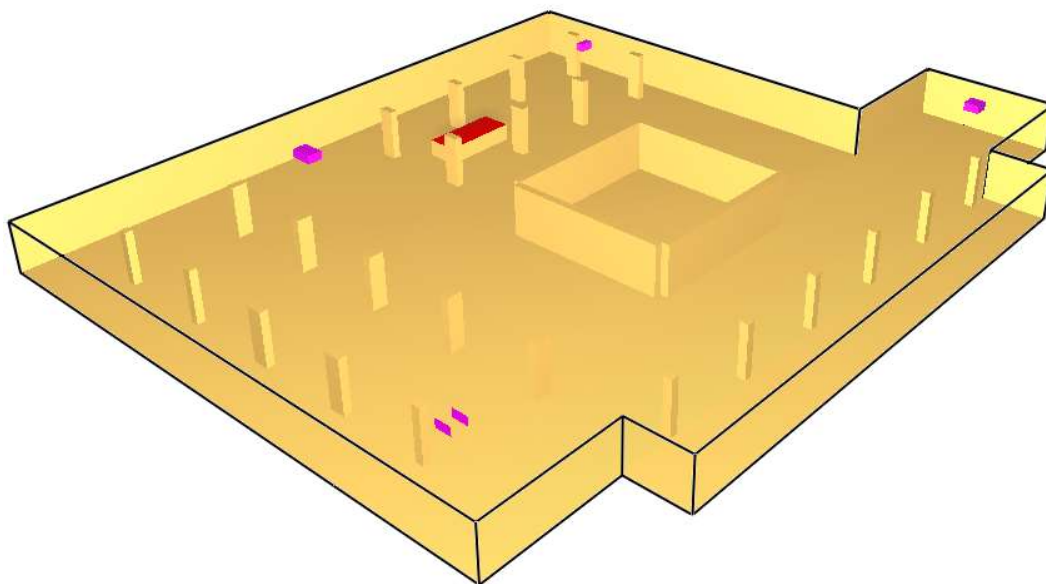
Krivulja oslobađanja topline nalazi se na slici 12. (mjerna jedinica apscise je min). Izgaranje je modelirano pomoću jednostavnog modela izgaranja, a vrsta goriva je benzin. *PyroSim* računa količinu dimnih plinova na temelju specifične topline izgaranja, koja u ovom slučaju iznosi 42,8 MJ/kg.



Slika 12. Krivulja oslobađanja topline [3]

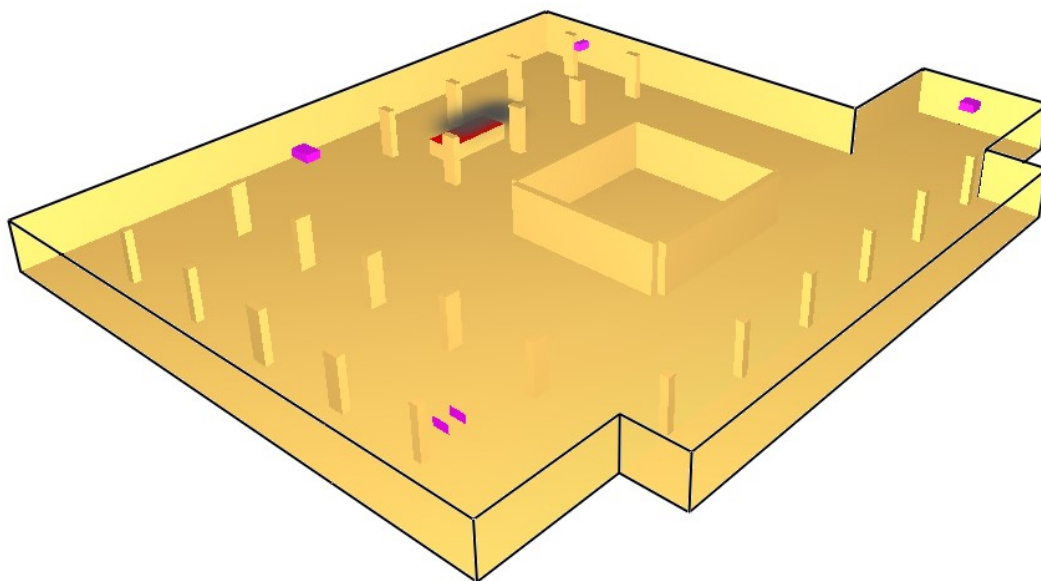
#### 5.4. Rezultati CFD analize

U ovom poglavlju biti će prikazani rezultati slika kroz karakteristične vremenske trenutke simulacije. Kao što je već naglašeno polje brzine strujanja fluida je potrebno za provjeru kvalitete odabranih položaja ventilatora, provjere vidljivosti na ulazu u garažu ( zbog evakuacije i dolaska vatrogasaca) i okvirno vrijeme trajanja odimljavanja garaže. Također je potrebno provjeriti temperature zraka na visini od 1.7 m u skladu sa požarnim standardima. Ravnine u kojima su prikazana polja brzine strujanja jesu visina od  $z = 3.1425$  m ( simetrija ventilatora ) i na visini od  $z = 2.5$  m. U prilogu ovog rada predana je animacija.

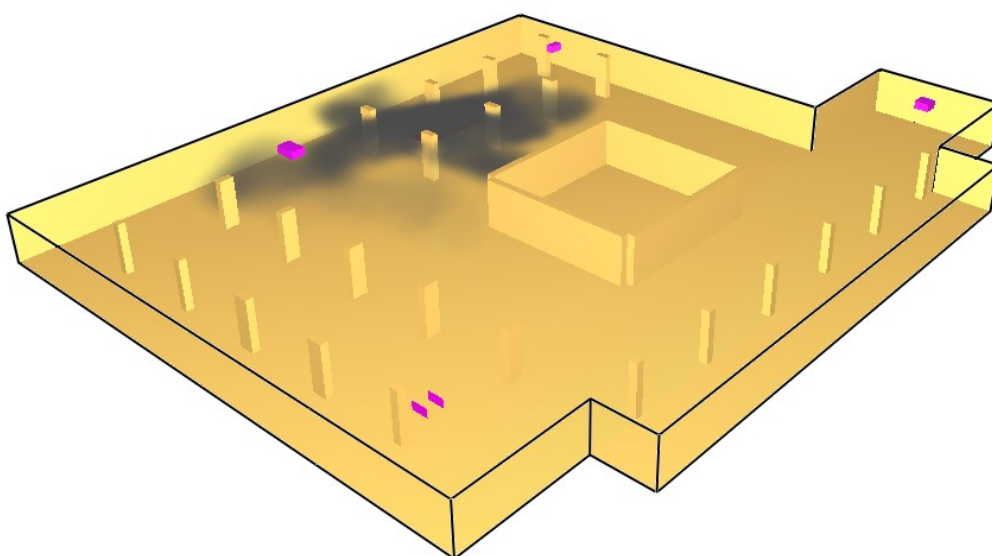


Slika 13. Konture dima gorućeg vozila nakon 1 min



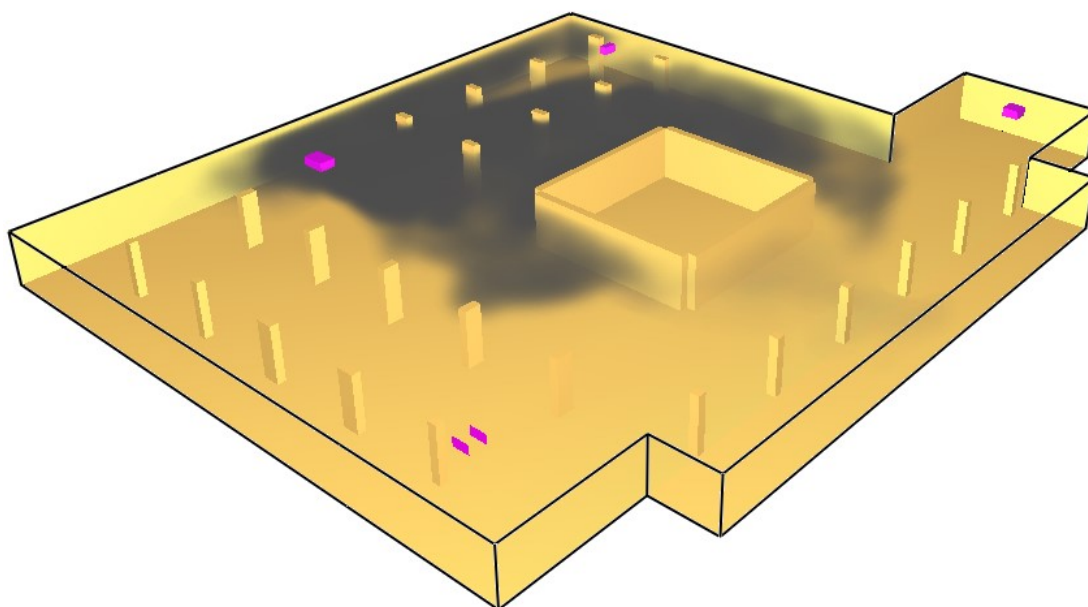


**Slika 14. Konture dima gorućeg vozila nakon 3 minute**

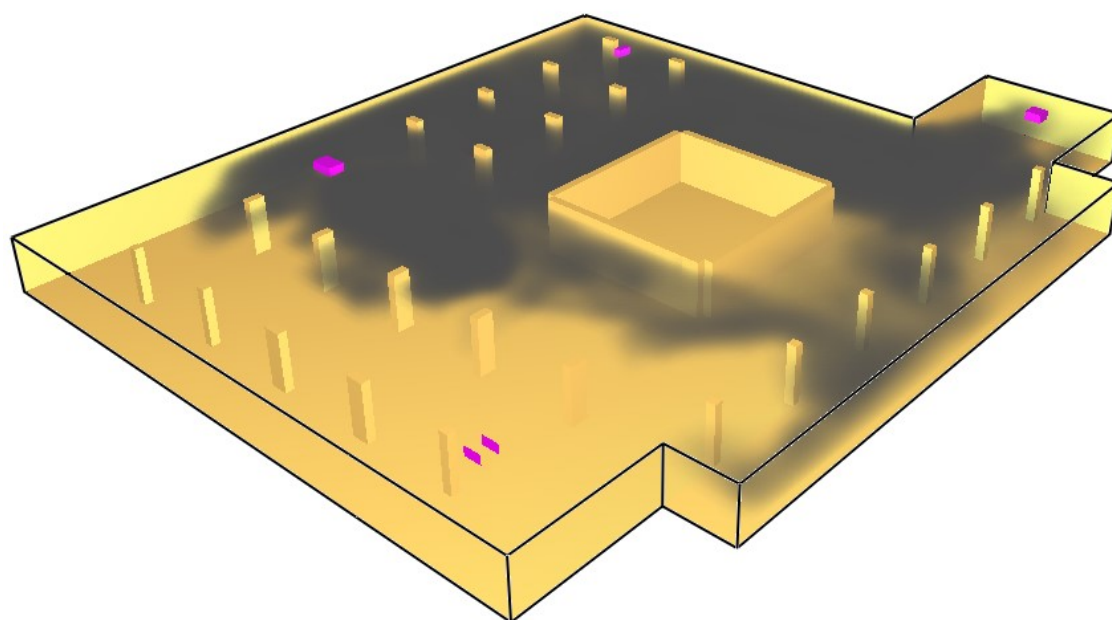


**Slika 15. Konture dima gorućeg vozila nakon 10 minuta**

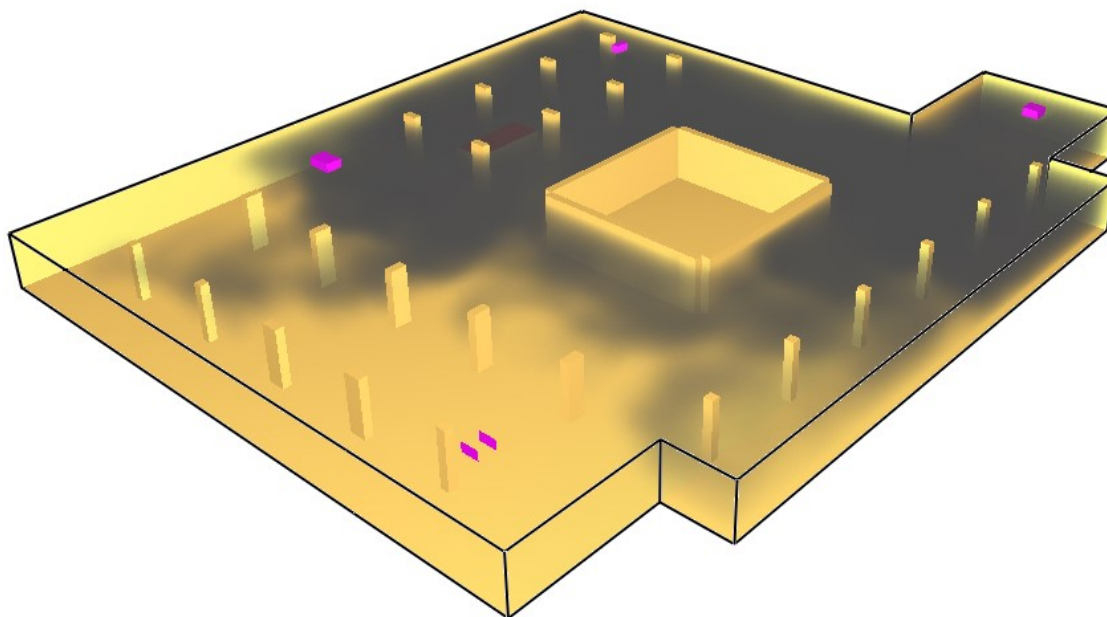




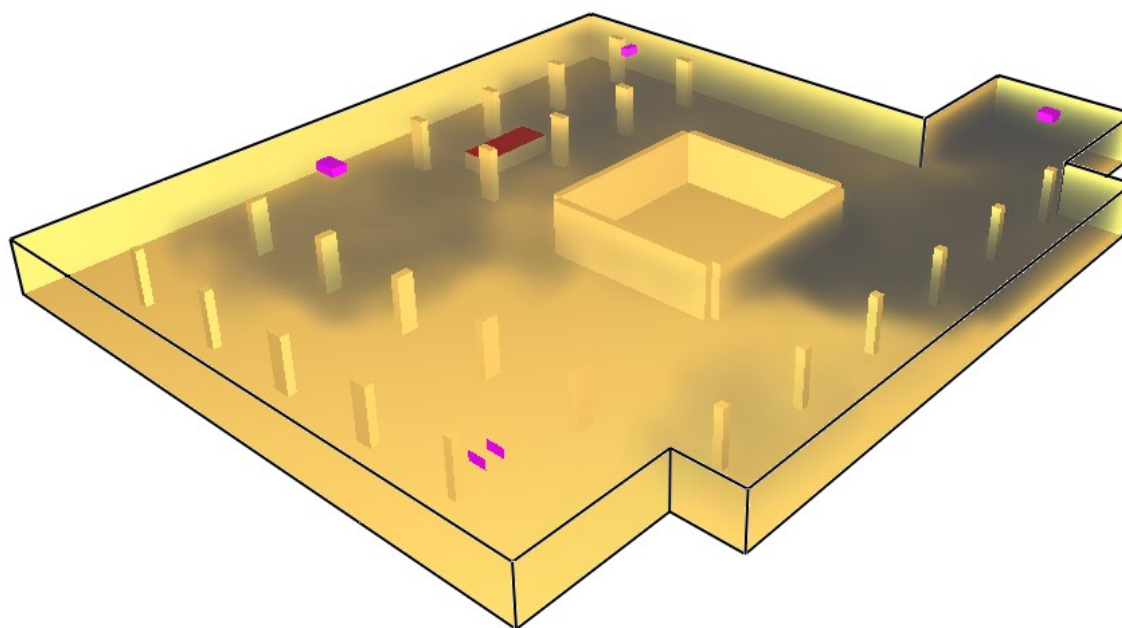
**Slika 16. Konture dima gorućeg vozila nakon 20 minuta**



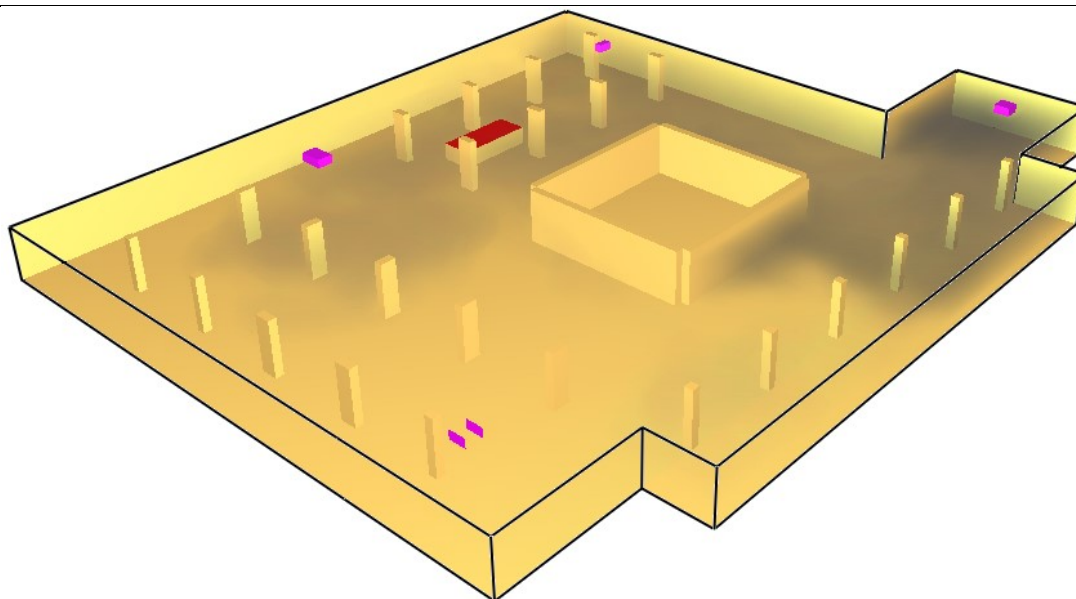
**Slika 17. Konture dima gorućeg vozila nakon 30 minuta**



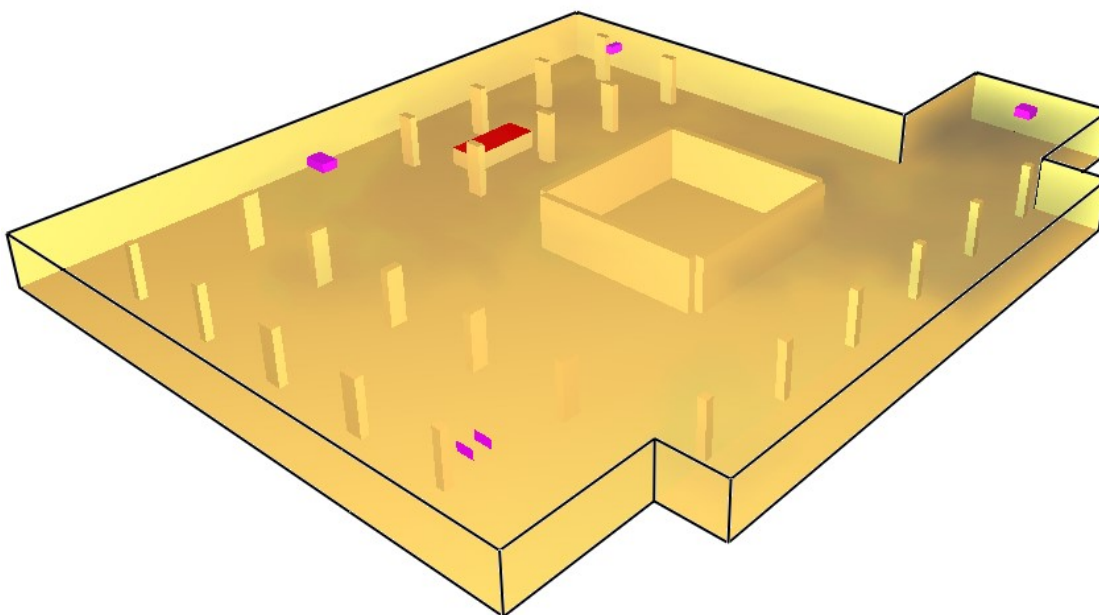
Slika 18. Konture dima gorućeg vozila nakon 45 minuta



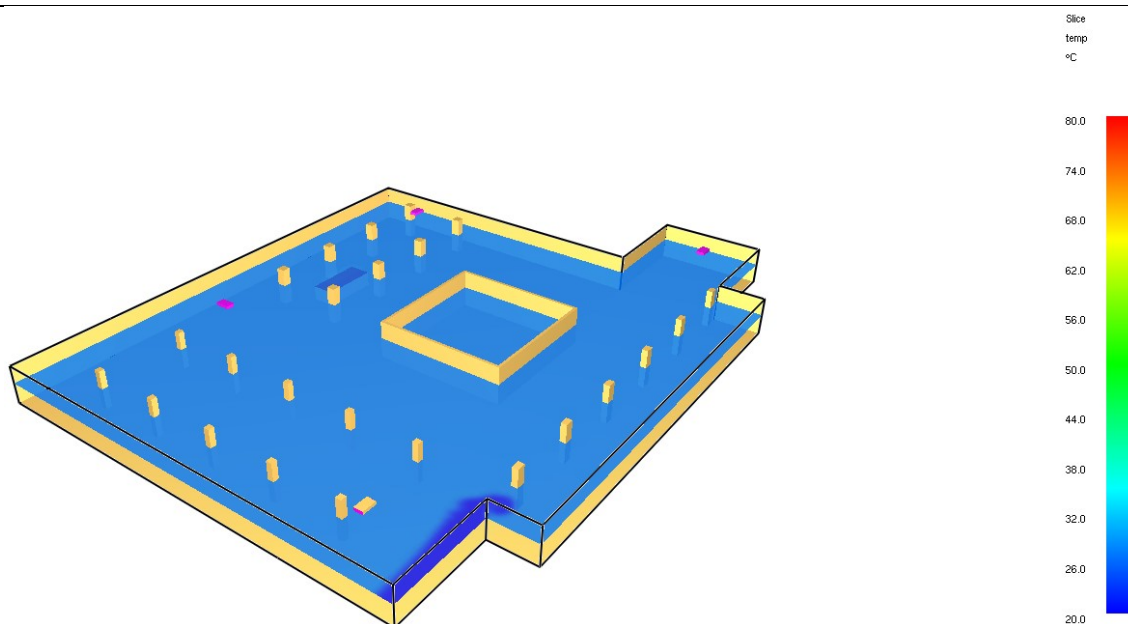
Slika 19. Konture dima gorućeg vozila nakon 80 minuta



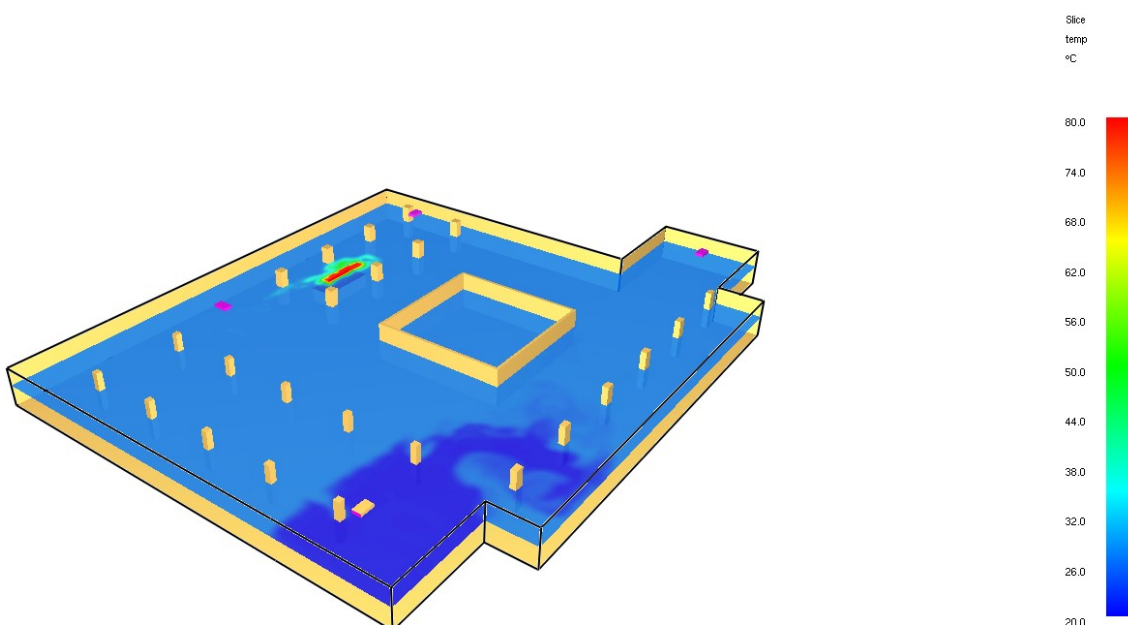
Slika 20. Konture dima gorućeg vozila nakon 110 minuta



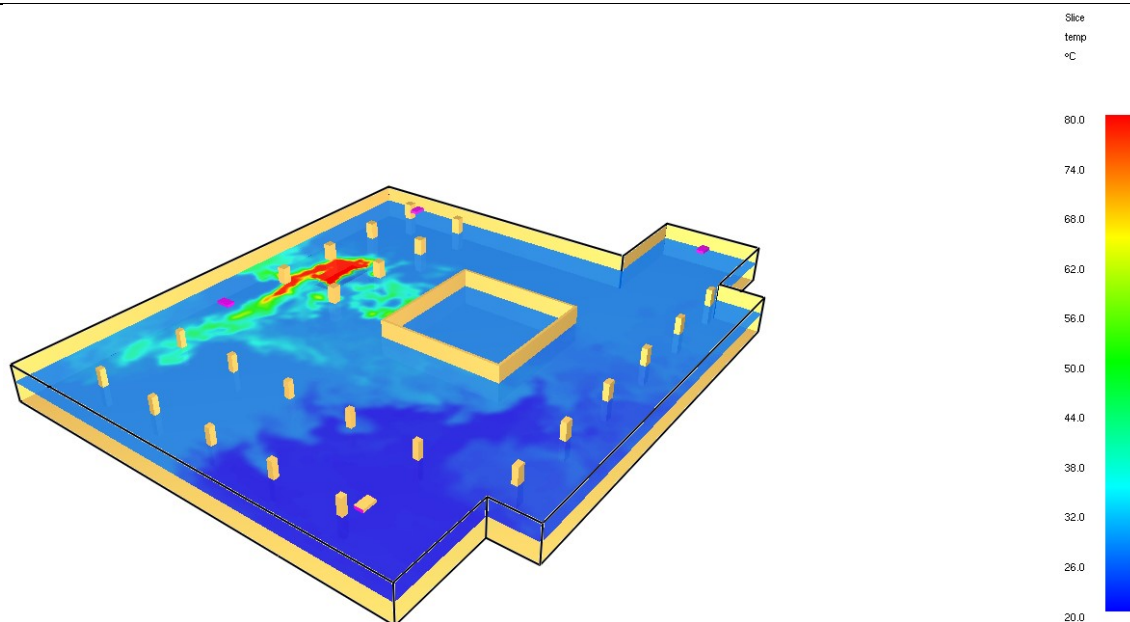
Slika 21. Konture dima gorućeg vozila nakon 140 minuta



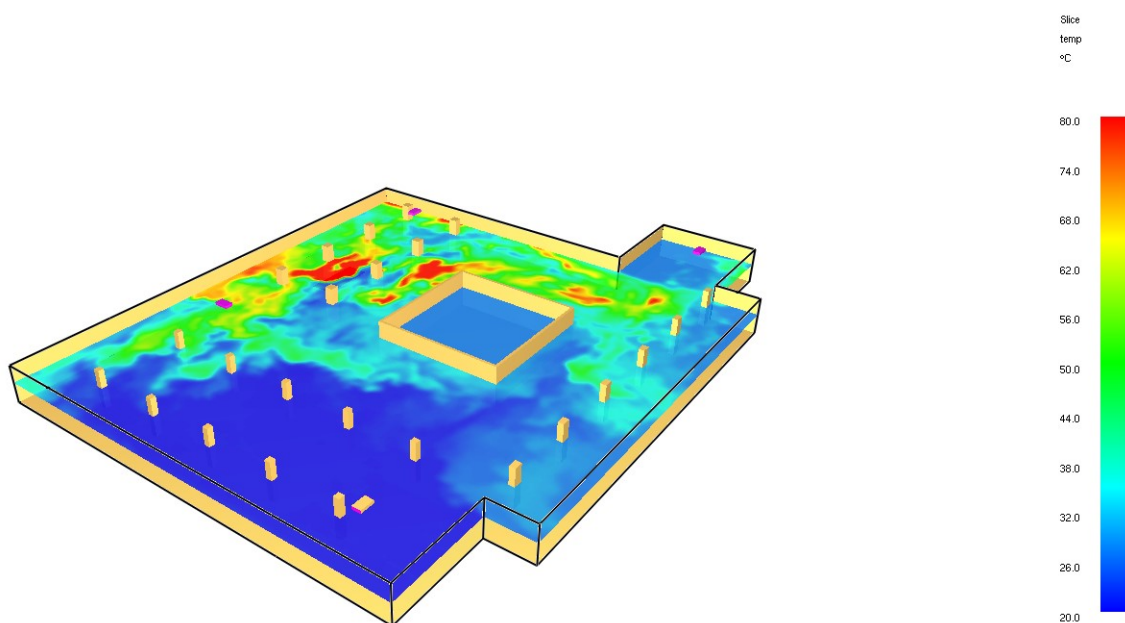
Slika 22. Konture temperature na visini 1.7 m nakon 1 minute



Slika 23. Konture temperature na visini 1.7 m nakon 5 minuta

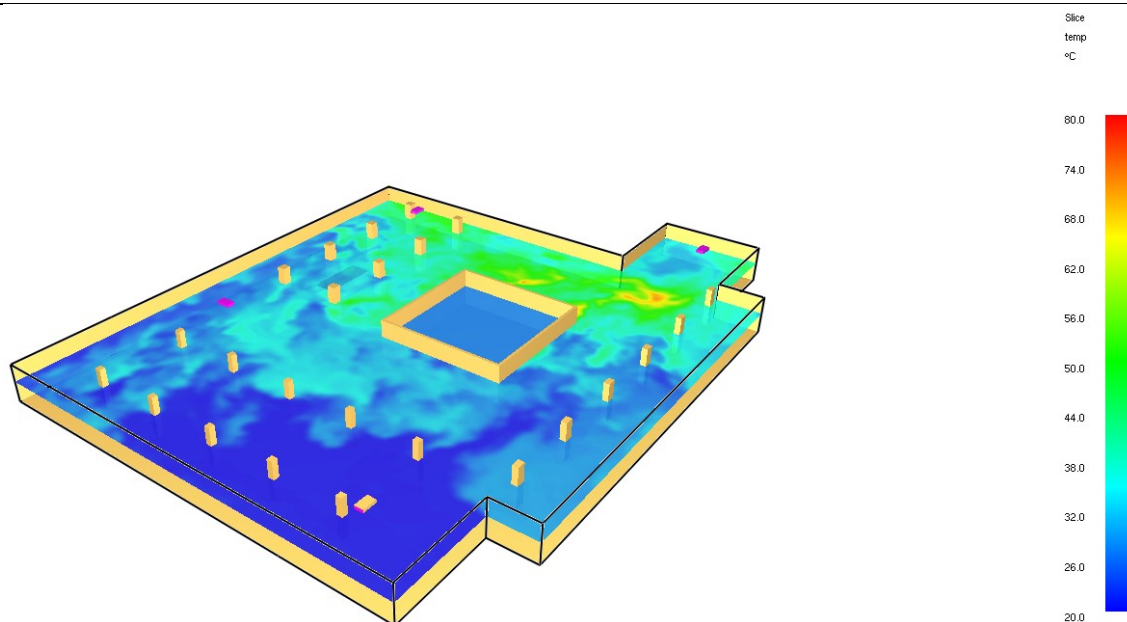


Slika 24. Konture temperature na visini 1.7 m nakon 10 minuta

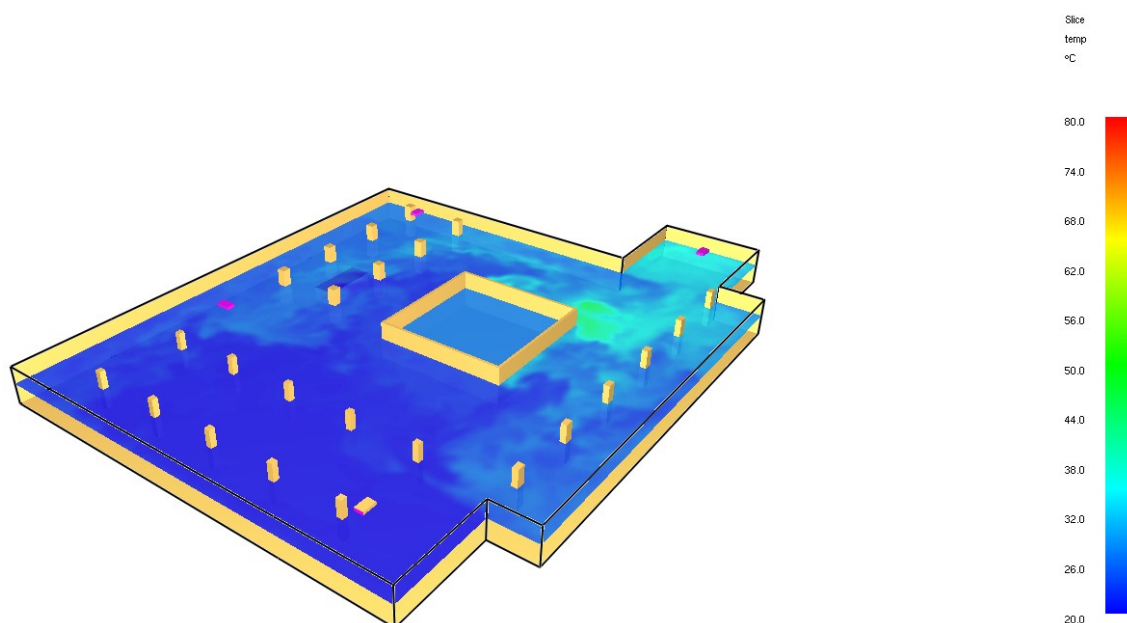


Slika 25. Konture temperature na visini 1.7 m nakon 30 minuta

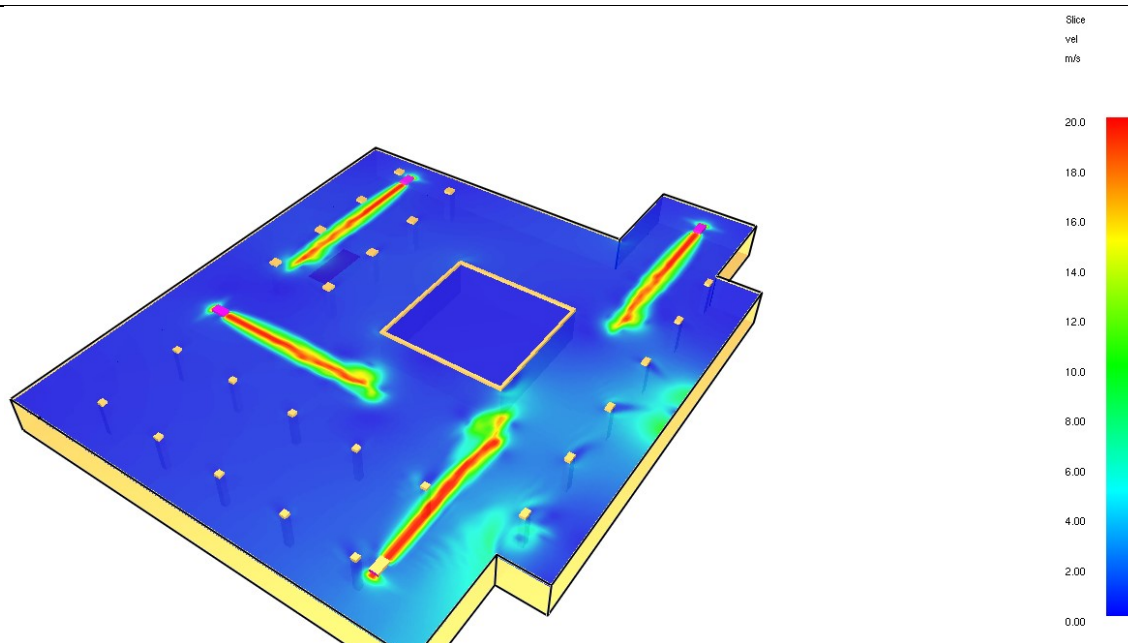




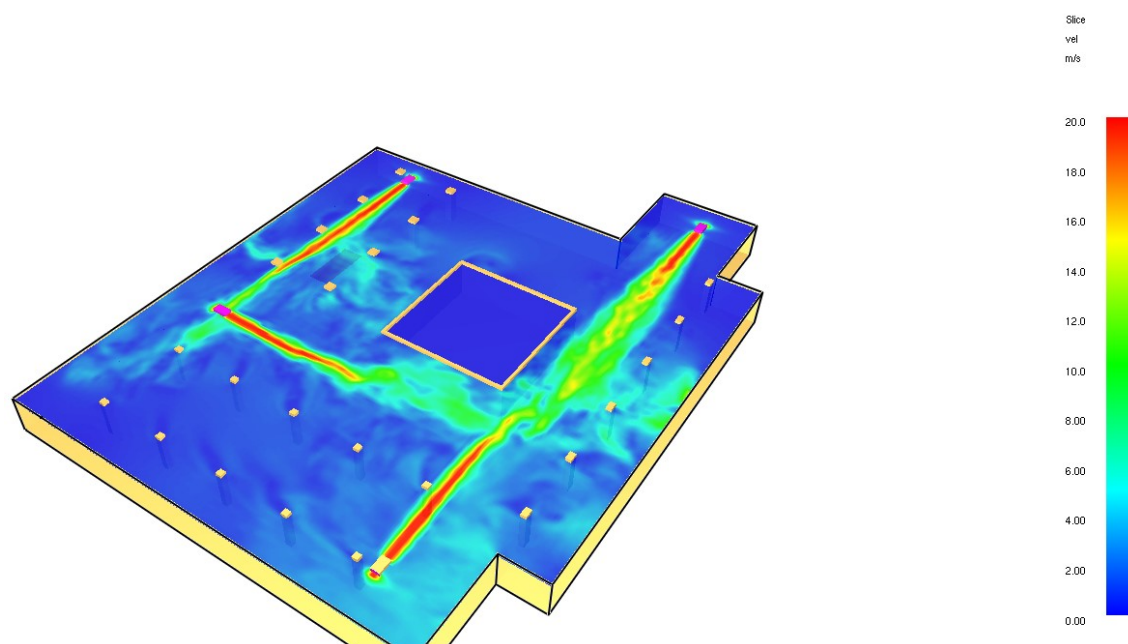
Slika 26. Konture temperature na visini 1.7 m nakon 45 minuta



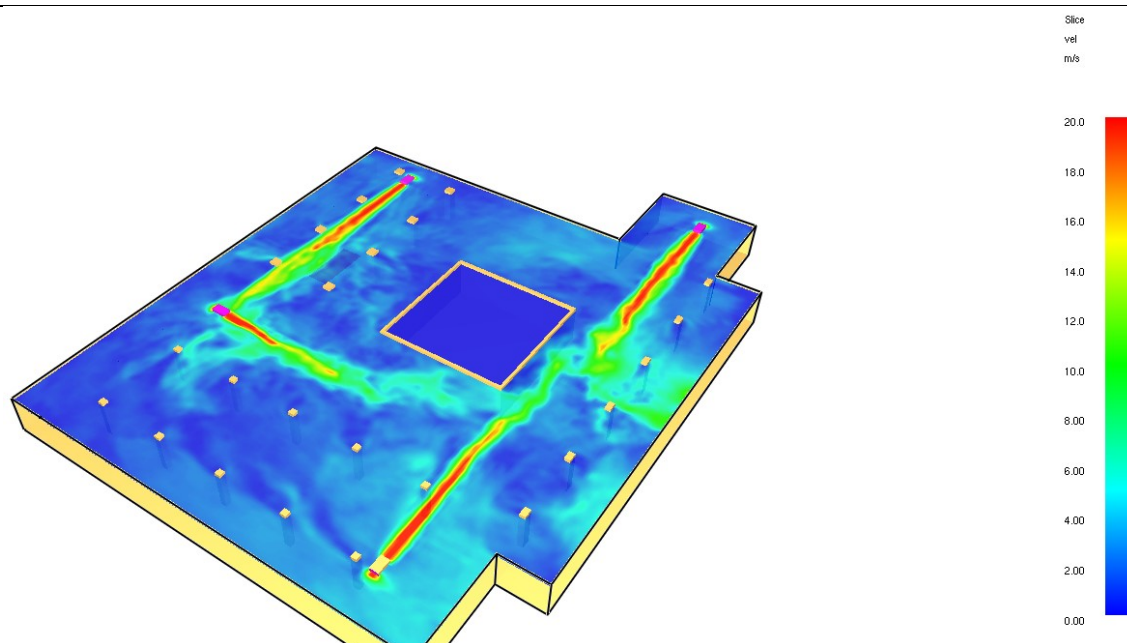
Slika 27. Konture temperature na visini 1.7 m nakon 80 minuta



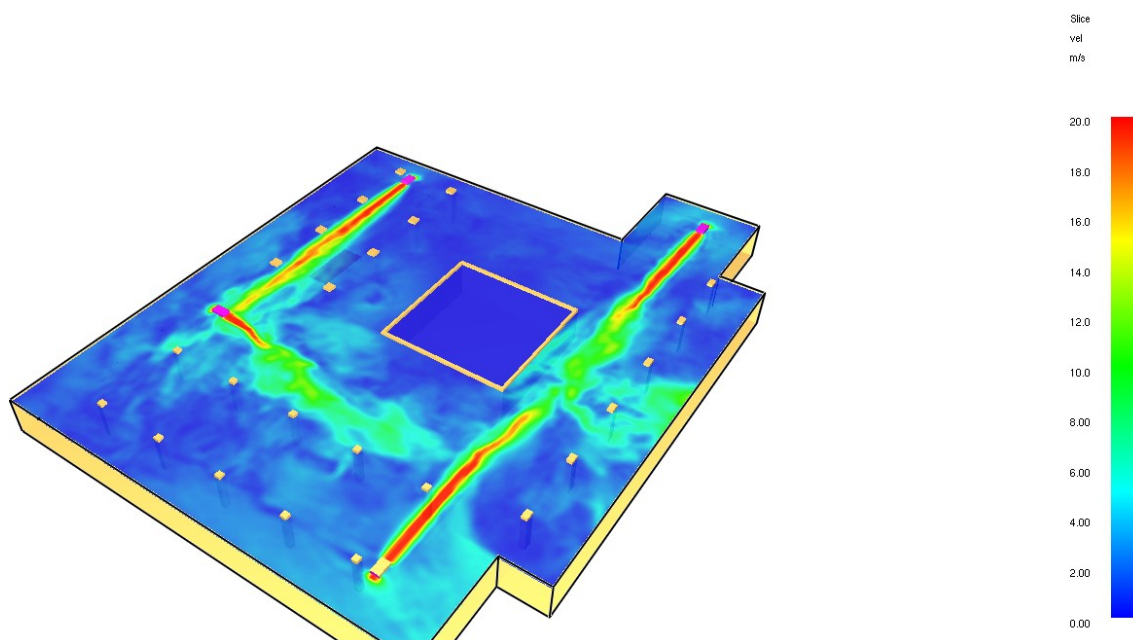
Slika 28. Konture polja brzine na visini od 3.1425 m nakon 1 minute



Slika 29. Konture polja brzine na visini od 3.1425 m nakon 10 minuta

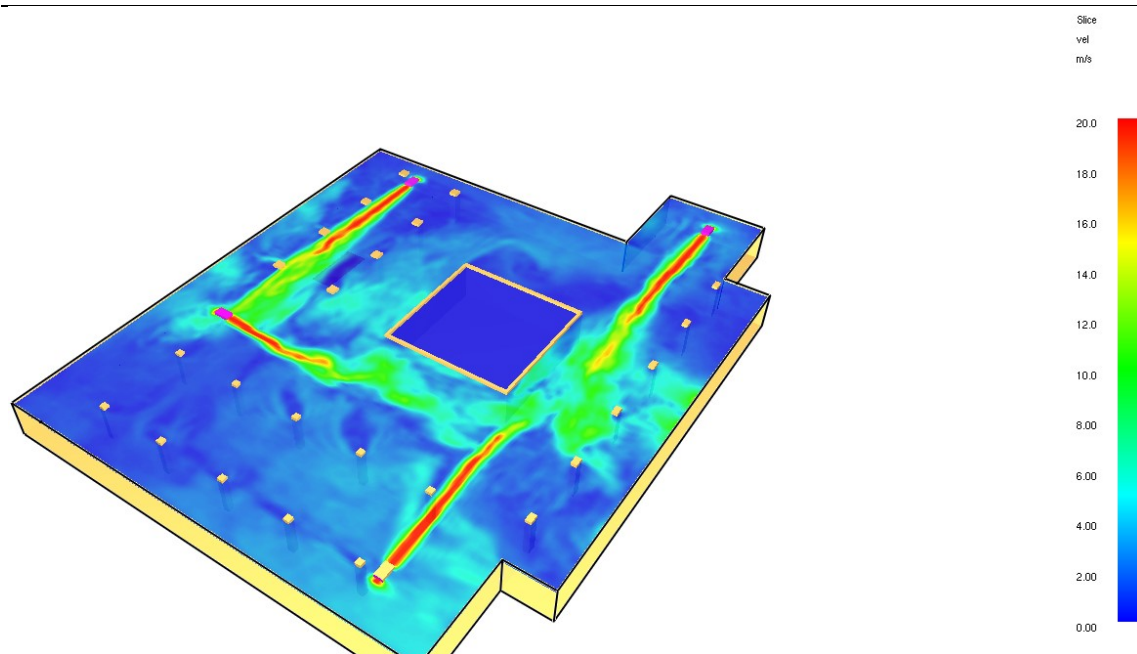


Slika 30. Konture polja brzine na visini od 3.1425 m nakon 30 minuta

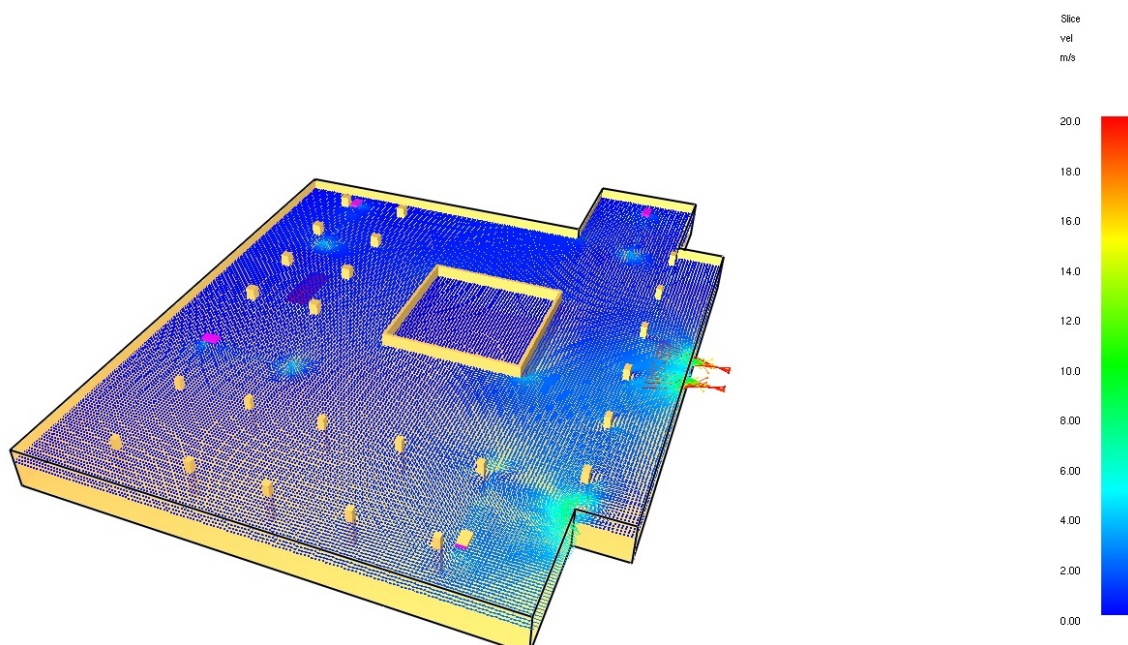


Slika 31. Konture polja brzine na visini od 3.1425 m nakon 45 minuta

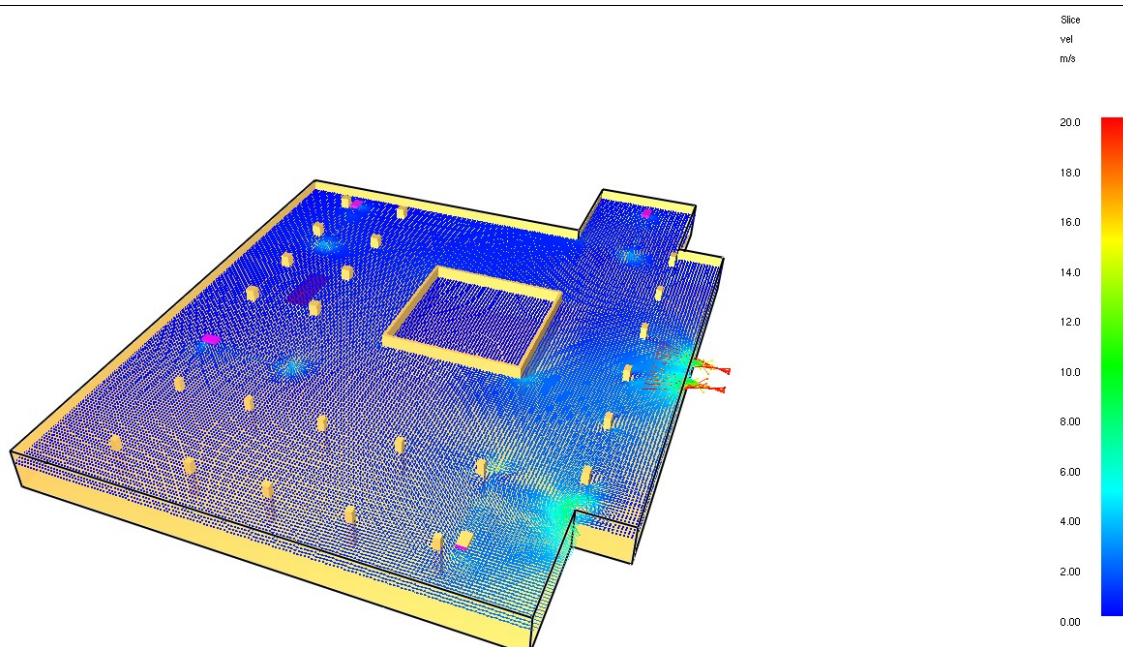




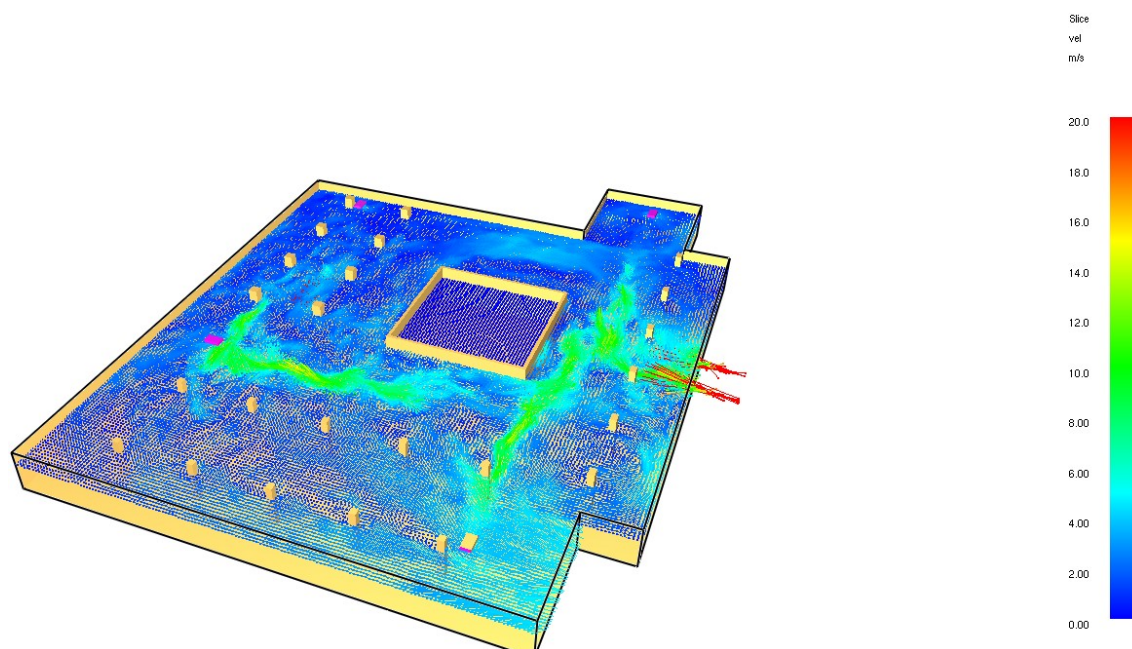
Slika 32. Konture polja brzine na visini od 3.1425 m nakon 80 minuta



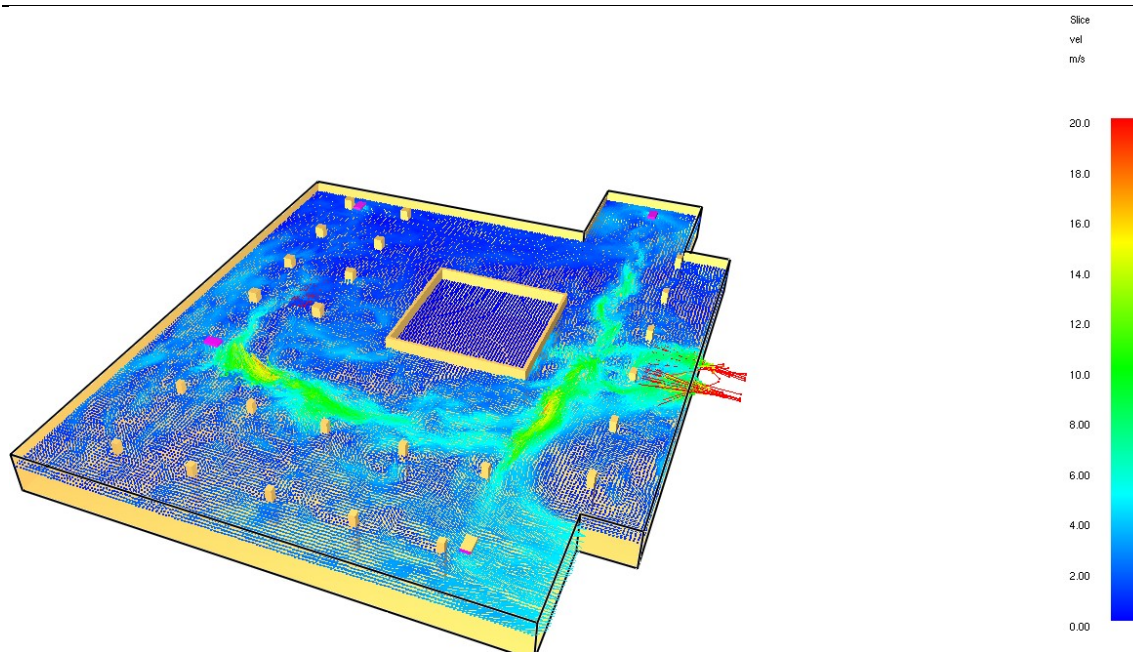
Slika 33. Vektorski prikaz polja brzina na visini od 2.5 m nakon 1 minute



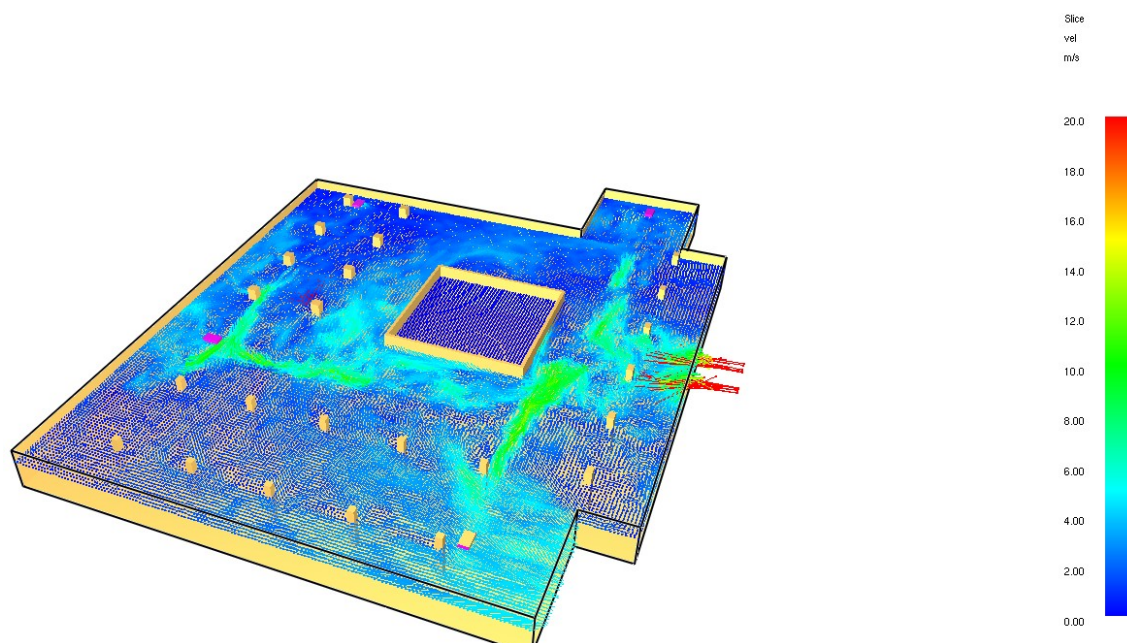
Slika 34. Vektorski prikaz polja brzina na visini od 2.5 m nakon 10 minuta



Slika 35. Vektorski prikaz polja brzine na visini od 2.5 m nakon 30 minuta



Slika 36. Vektorski prikaz polja brzina na visini od 2.5 m nakon 45 minuta



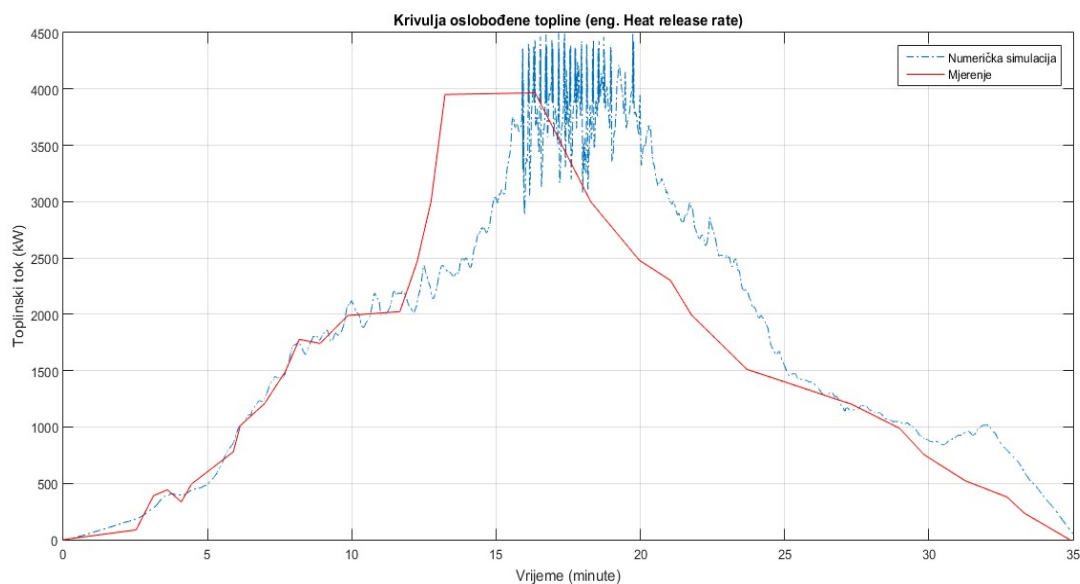
Slika 37. Vektorski prikaz polja brzine na visini od 2.5 m nakon 30 minuta

## 6. Zaključak

Ovom CFD analizom ispitana je kvaliteta odabira položaja i broja ventilatora u požarnom ventilacijskom sustavu. Napravljene su simulacije na dvije mreže. Zbog uštede na računalnim resursima uvedene su dodatne pretpostavke i pojednostavljenja modela. Pretpostavljeno je da se ventilatori uključuju od početnog trenutka simulacije. Prema slici 38. može se uočiti sličnost krivulje oslobađanja topline, sa eksperimentalnim podacima na slici.

Nakon analize rezultata numeričke simulacije zaključuje se sljedeće:

- Dim se nije proširio na cijelo područje garaže. Ovako postavljeni ventilatori spriječili su širenje dima prema ulaznoj rampi.
- Nakon što je vatra prestala goriti nakon 35 minute, ventilacijski sustav je izvukao dim iz garaže za 105 min.
- Omogućen je put za slučaj evakuacije i prilaz za vatrogasce.
- Prema standardima o sigurnosti i postojanosti temperature dimnih plinova na visini od 1.7 m, požarni ventilacijski sustav nije zadovoljio (slika 25.)
- Potrebno je napraviti rekonstrukciju sa još barem dva impulsna ventilatora i novim izborom lokacija ventilatora.



Slika 38. Usporedba rezultata simulacije s eksperimentalnim podacima



## **LITERATURA**

- [1] Jović, V.: Osnove hidromehanike, Element, Zagreb, 2006.
- [2] Virag, Z., Džijan, I.: Računalna dinamika fluida, Predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [3] Van oerle, N., Lemaire, A. and van de Leur, P.: Effectiveness of Forced Ventilation in Closed Car Parks.“ TNO Report No. 1999-CVB-RR11442, TNO, Delft, 1999.
- [4] Volarić, F.: Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.
- [5] Mc Grattan, K., Hostikka, S., McDermott R., Floyd, J., Weinschenk, C., Overholt, K.: Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide, National Institute of Standards and Technology, 2017.
- [6] Mc Grattan, K., Hostikka, S., McDermott R., Floyd, J., Weinschenk, C., Overholt, K.: Fire Dynamics Simulator User Manual, National Institute of Standards and Technology, 2017.
- [7] Aveiro J.L., C. Viegas, J.C.: Smoke control in an underground cark park with impulse ventilation, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisabon, 2010.

## **PRILOZI**

### **I. CD-R disc**